

VŠB – Technická Univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra energetiky

Návrh měření průtoku přehřáté páry a napájecí vody pomocí clon

Proposal of measurement of superheated steam and feed water flow
using orifice plates

Student:

Pavloková Petra

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Michal Stáňa, PhD.

Ostrava 2010

Zadání bakalářské práce

Student: **Petra Pavloková**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 3907R004 Provoz a řízení v energetice
Téma: **Návrh měření průtoku přehřáté páry a napájecí vody pomocí clon**
**Proposal of Measurement of Superheated Steam and Feed Water Flow
Using Orifice Plates**

Zásady pro vypracování:

- 1) Porovnejte nejčastěji v energetice používané způsoby měření průtoku.
- 2) Porovnejte jednotlivé typy clon.
- 3) Navrhnete měření průtoku napájecí vody pomocí clony pro dva snímače diferenčního tlaku s různými rozsahy.
- 4) Navrhnete měření průtoku přehřáté páry pomocí clony pro dva snímače diferenčního tlaku s různými rozsahy.
- 5) Posuďte vhodnost použití termočlánku a odporového snímače teploty Pt100.
- 6) Porovnejte navržené varianty z hlediska ekonomického a z hlediska přesnosti měření

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] ČSN EN ISO 5167 – 1 Měření průtoku tekutin pomocí snímačů diferenčního tlaku vložených do zcela zaplněného potrubí kruhového průřezu – Část 1: Obecné principy a požadavky, Český normalizační institut, listopad 2003
- [2] ČSN EN ISO 5167 – 2 Měření průtoku tekutin pomocí snímačů diferenčního tlaku vložených do zcela zaplněného potrubí kruhového průřezu – Část 2: Clony, Český normalizační institut, listopad 2003
- [3] BEJČEK, L., ĎAŘO, S., PLATIL, A. *Měření průtoku a výšky hladiny*, BEN 2006
- [4] KOČIŠ, Š., STÁNA, M., VILIMEC, L. *Provoz a regulace energetických zařízení*, VŠB 2007
- [5] www.mattech.cz
- [6] www.yokogawa.cz
- [7] www.emersonprocess.cz

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Michal Stáňa, PhD.**

Datum zadání: 18.12.2009

Datum odevzdání: 21.05.2010



prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.
vedoucí katedry



prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě: 20. 5. 2010

Parolková Petra
.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byla seznámena s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́домі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі, že odevzdáním své bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 20. 5. 2010

Pavlovská Petra
.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Petra Pavlovková

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Skalice 395, Frýdek-Místek, 738 01

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Pavloková, P. *Návrh měření průtoku přehřáté páry a napájecí vody pomocí clon : bakalářská práce*. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2010, 54 s, Vedoucí práce: Ing. Stáňa, M. PhD

Tato bakalářská práce pojednává o měření průtoku a metodách, které jsou v energetice využívány. V praktické části se zabývám konkrétním návrhem měření průtoku přehřáté páry a napájecí vody pomocí clony pro dva snímače diferenčního tlaku s různými rozsahy. Vycházím ze zadaných hodnot a navrhuji clonu, která bude odpovídat požadavkům normy. Výsledkem jsou dva clonové kotouče pro přehřátou páru a napájecí vodu. V další části bylo mým úkolem posoudit vhodnost použití termočlánku a odporového snímače teploty Pt100 a jejich vliv na nejistotu měření průtoku. Závěrem je pak zhodnocení navrženého řešení z hlediska ekonomického.

KLÍČOVÁ SLOVA

- měření průtoku
- měřicí metody
- použití
- clona

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

Pavloková, P. *Proposal of Measurement of Superheated Steam and Feed Water Flow Using Orifice Plates : Bachelor Thesis*. Ostrava : VŠB - Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Power Engineering, 2010, 54 p. Thesis head: Ing. Stáňa M. PhD.

This bachelor thesis deals with flow measurement and the methods which are being used in energetics. The values have been set, my task involves designing an appropriate orifice which will comply with the requirements of the norm. As a result, there are two orifice plates for superheated steam and feed water. The next part of the thesis judges the propriety of using a thermojunction and a thermo- resistor Pt100 and how they affect steam flow measurement. The conclusion contains evaluation of the proposed concept from the economical point of view.

KEYWORDS

- flow measurement
- methods of measurement
- using
- orifice plate

Obsah

1	Seznam použitých značek a symbolů	9
1.1	Značky	9
1.2	Indexy	9
2	Úvod	10
2.1	Termíny a definice	10
2.1.1	Měření tlaku	10
2.1.2	Primární prvky	11
2.1.3	Proudění	11
3	Měření průtoku	12
3.1	Metody měření průtoku	12
3.2	Rozdělení průtokoměrů	13
3.2.1	Objemová měřidla	14
3.2.2	Hmotnostní měřidla	14
3.2.3	Rychlostní měřidla	15
4	Měření průtoku pomocí škrťacích orgánů	16
4.1	Venturiho trubice	16
4.2	Dýza	17
4.3	Clona	17
4.4	Porovnání škrťacích orgánů	18
5	Clony	19
5.1	Typy clon	19
6	Návrh měření průtoku přehřáté páry a napájecí vody pomocí clon	23
6.1	Postup výpočtu	24
6.1.1	Hmotnostní průtok	24
6.1.2	Součinitel průtoku	24
6.1.3	Součinitel expanze	26
6.2	Výpočet pro měření průtoku napájecí vody pomocí clony pro dva snímače diferenčního tlaku s různými rozsahy	26
6.2.1	Stanovení snímače diferenčního tlaku	29
6.2.2	Nejistoty	31
6.2.3	Porovnání návrhu clony vzhledem k velikosti tlakové ztráty	34

6.3	Výpočet měření průtoku přehřáté pomocí clony pro dva snímače diferenčního tlaku s různými rozsahy	35
6.3.1	Zvýšení diferenčního tlaku	37
6.3.2	Stanovení rozsahu diferenčního tlaku	38
6.3.3	Nejistoty	39
6.3.4	Porovnání návrhu clony vzhledem k velikosti tlakové ztráty	41
6.4	Návrh rozměrů clony dle normy ČSN EN ISO 51671-2	42
6.4.1	Parametry clony	42
6.4.2	Návrh rozměrů clony pro měření napájecí vody	43
6.4.3	Návrh rozměrů clony pro měření přehřáté páry.....	45
7	Porovnání navržených variant z hlediska ekonomického a z hlediska přesnosti měření	46
7.1	Porovnání navržených variant z hlediska přesnosti měření	46
7.2	Porovnání navržených variant z hlediska ekonomického	48
7.2.1	Ekonomické srovnání pro termočlánek typu K a teplotní snímač Pt100.....	50
8	Závěr	52
9	Seznam použité literatury	54
10	Seznam příloh	54

1 Seznam použitých značek a symbolů

1.1 Značky

Tabulka 1

Značka	Veličina	Rozměr ^a	Jednotka SI
C	součinitel průtoku	bezrozměrový	1
d	průměr otvoru clony	L	m
D	vnitřní průměr potrubí	L	m
H	entalpie	ML^2/T^2mol^1	J/mol
K	součinitel tlakové ztráty	bezrozměrový	1
I	vzdálenost odběrů tlaku	L	m
L	relativní vzdálenost odběrů tlaku ($L=I/D$)	bezrozměrový	1
p	absolutní statický tlak tekutiny	M/L^1T^2	Pa
q_m	hmotnostní průtok	M/T^1	kg/s
q_v	objemový průtok	L^3/T^1	m^3/s
Ra	střední aritmetická úchylka (drsnosti) profilu	L	m
Re	Reynoldsovo číslo	bezrozměrový	1
Re_D	Reynoldsovo číslo vztažené k D	bezrozměrový	1
Re_d	Reynoldsovo číslo vztažené k d	bezrozměrový	1
t	teplota tekutiny	Θ	$^{\circ}C$
T	absolutní (termodynamická) teplota tekutiny	Θ	K
β	poměr průměrů ($\beta=d/D$)	bezrozměrový	1
Δp	diferenční tlak	M/L^1T^2	Pa
$\Delta\omega$	tlaková ztráta vyvozené primárním prvkem	M/L^1T^2	Pa
ε	součinitel expanze	bezrozměrový	1
κ	izoentropický exponent b	bezrozměrový	1
λ	součinitel tření	bezrozměrový	1
μ	dynamická viskozita tekutiny	M/L^1T^1	Pa.s
ν	kinematická viskozita tekutiny ($\nu = \mu/\rho$)	L^2/T^1	m^2/s
ξ	relativní tlaková ztráta	bezrozměrový	1
ρ	hustota tekutiny	M/L^3	kg/m^3
^a M = hmotnost, L = délka, T = čas, Θ = teplota			

1.2 Indexy

Tabulka 2

Index	Význam
1	Před místem odběru
2	Za místem odběru
20	při teplotě 20 $^{\circ}C$
d	vztaženo k d
D	vztaženo k D
C	celkový

2 Úvod

Měření průtoku patří mezi frekventované úlohy měřicí a regulační techniky v průmyslu i laboratorní praxi. V energetice se měří průtok zejména při požadavcích na regulaci, bilanční technicko-ekonomické hodnocení, fakturační měření a stanovování hmotnostní bilance materiálových toků podniku.

V praxi se sleduje pomocí měřidel průtoku emise vypuštěné do ovzduší, průtoky pracovních médií u energetických zařízení za účelem zjišťování jejich účinností a výkonností. Jako odběratelé energie se s průtokoměry můžeme setkat v podobě plynoměrů, vodoměrů a elektroměrů.

Vzhledem k rostoucím cenám za vodu a teplo roste také potřeba přesného a objektivního měření. Technický pokrok přinesl v oblasti metrologie řadu metod a jejich inovací. Ve společném zájmu průmyslových podniků je nezbytné minimalizovat chyby průtokových měřidel. A to zejména zvolením vhodného typu měřicí metody, přesným návrhem a konstrukcí měřicího přístroje.

2.1 Termíny a definice

Pro účely této bakalářské práce jsou použity termíny a definice uvedené v normě ČSN EN ISO 5167. Následující kapitola cituje tuto normu [3].

2.1.1 Měření tlaku

- **Odběr tlaku ve stěně**

Prstencová nebo kruhová dutina, vyvrtaná ve stěně potrubí takovým způsobem, že hrana dutiny lícuje s vnitřním povrchem potrubí.

- **Statický tlak tekutiny proudící potrubím**

P – tlak, který může být změřen pomocí tlakoměru na odběr tlaku ve stěně.

- **Diferenční tlak**

Δp – rozdíl mezi (statickými) tlaky měřenými v odběrech tlaku ve stěně, z nichž jeden je před a druhý za primárním prvkem (nebo v hrdle Venturiho dýzy a Venturiho trubice), vloženým do přímého potrubí, jímž protéká tekutina, při uvažování všech rozdílů ve výšce odběrů před a za primárním prvkem.

- **Poměr tlaků**

τ – poměr absolutního (statického) tlaku v odběru za primárním prvkem k tlaku v odběru před primárním prvkem.

2.1.2 Primární prvky

- **Clona, hrdlo**

Nejmenší otvor primárního prvku

- **Clonový kotouč**

Tenká deska, v níž je vytvořen otvor

- **Dýza**

Prvek sestává z konvergentního vtoku, spojeného s válcovitým úsekem, obecně nazývaným „hrdlo“.

- **Venturiho dýza**

Prvek sestává z konvergentního vtoku, kterým je normalizovaná dýza ISA 1932 spojená s válcovitou částí nazývanou hrdlo a rozšiřujícím se kuželovitým úsekem nazývaným „difuzor“.

- **Venturiho trubice**

Prvek sestávající z konvergentního vtoku, který je kuželovitý a spojený s válcovitou částí nazývanou „hrdlo“ a rozšiřujícím se kuželovitým úsekem nazývaným „difuzor“.

- **Poměr průměrů**

β – primárního prvku použitým v daném potrubí. Poměr průměrů clonového otvoru (nebo hrdla) primárního prvku k vnitřnímu průměru měřicího potrubí před primárním prvkem.

2.1.3 Proudění

- **Průtok**

q – hmotnost nebo objem tekutiny proudící otvorem clony za jednotku času.

- Hmotnostní průtok

q_m – hmotnost tekutiny proudící otvorem clony za jednotku času. Např.: kg/s .

- Objemový průtok

q_v – objem tekutiny proudící otvorem clony za jednotku času. Např. m_N^3/s .

- **Reynoldsovo číslo**

Re – bezrozměrný parametr vyjadřující poměr mezi setrvačnými silami a třecími silami.

- Reynoldsovo číslo potrubí

Re_D – bezrozměrný parametr vyjadřující poměr mezi setrvačnými silami a třecími silami v potrubí před primárním prvkem.

- Reynoldsovo číslo clony nebo hrdla

Re_d – bezrozměrný parametr vyjadřující poměr mezi setrvačnými silami a třecími silami ve cloně nebo v hrdle primárního prvku.

- **Izoentropický exponent**

κ – poměr relativní změny tlaku k odpovídající relativní změně hustoty za podmínek elementární vratné adiabatické (izoentropické) změny.

- **Součinitel průtoku**

C – součinitel stanovený pro proud nestlačitelné tekutiny, který udává poměr skutečného průtoku primárním prvkem k teoretickému průtoku.

- **Součinitel expanze**

ε – součinitel, který se používá k výpočtu stlačitelnosti tekutiny.

- **Střední aritmetická úchylka (drsnosti) profilu**

Ra – střední aritmetická úchylka od střední čáry profilu, v němž se má měřit.

3 Měření průtoku

Následující kapitola čerpá z literatury[1]

Měření průtoku je v poslední době velmi rychle se rozvíjejícím odvětvím průmyslu. Měří se za účelem stanovení energeticko-ekonomicko-technických bilancí. Zjišťují se tak provozní náklady, získaný výkon, odběrová charakteristika, účinnost energetických zařízení, popřípadě míra jejich opotřebení.

V současnosti nabízí průmyslový trh obrovské množství měřicích přístrojů, které jsou založeny na nejrůznějších fyzikálních principech. Při volbě vhodného průtokoměru musíme zohlednit jak aspekty technické, tak aspekty ekonomické.

3.1 Metody měření průtoku

Existence různých průtokoměrů je podmíněná tím, že existují velké rozdíly v chemických i fyzikálních vlastnostech průmyslových tekutin a v podmínkách i účelu měření metod, které pracují na mnoha principech. Lze je klasifikovat dle třech hledisek:

- **Metody objemové**

Vyznačují se odměřováním tekutin v odměrných prostorách. Během měřicího cyklu dochází k opakovanému plnění a vyprazdňování odměrných prostor a měřítkem proteklého množství je počet měřicích cyklů.

- **Metody hmotnostní**

Jsou charakteristické tím, že se měří veličina, která je přímo úměrná hmotnostnímu průtoku.

- **Metody rychlostní**

Jsou založeny na vhodném způsobu měření rychlosti proudícího média a ze znalosti průtočného profilu a průřezu se vypočítává objemový průtok.

3.2 Rozdělení průtokoměrů

V současnosti se na průmyslovém trhu nachází řada průtokoměrů a velké množství přístrojů od různých výrobců. Při výběru vhodného průtokoměru je velmi důležitý i funkční princip.

Každý průtokoměr se vyznačuje svými nedostatky a přednostmi. Většina přístrojů udává změřený průtok či proteklé množství při provozních podmínkách (tlak, teplota). V případě proměnných stavových veličin se provozní podmínky přepočítávají na určité vztažné podmínky. Moderní přístroje bývají vybaveny elektronickými obvody, které umožňují automatické provádění této korekce. Současný trend vývoje průtokoměrů je zaměřen na přímé měření hmotnostního průtoku, což je měření, které je nezávislé na teplotě, tlaku a viskozitě měřené tekutiny

V tabulce 3 jsou některé z těchto průtokoměrů. U těch nejzákladnějších a nejpoužívanějších jsou uvedeny principy, dle kterých pracují.

Tabulka 3

Typ měřidla	Princip	Provedení měřidel tohoto typu
Objemová měřidla	Jsou založena na principu odměřování objemu tekutin v odměrných prostorách	Zvonový krychloměr, Membránový plynoměr, pístová měřidla, bubnový průtokoměr kondenzátu, oválové měřidlo
Rychlostní měřidla	Určují průtok na základě naměřené hodnoty místní nebo průměrné rychlosti, znalosti profilu proudění a průtočného průřezu	Průtokoměry s měřením rozdílů tlaků
		Průtokoměry turbínové a lopatkové
		Elektromagnetické průtokoměry
		Ultrazvukové průtokoměry
Hmotnostní měřidla	Výstup snímače je závislý na hmotnostním průtoku média protékajícího průtokoměrem	Coriolisovy průtokoměry
		Tepelné průtokoměry

3.2.1 Objemová měřidla

Objemové měření průtoku se používá pro přesná bilanční měření a jako etalony pro ověřování jiných měřidel průtoků. Běžně se proto s objemovými měřidly lze setkat v podobě plynoměrů.

- **Membránový plynoměr**

Používá se pro měření množství plynu. Vzhledem k tomu, že se jedná o objemové měřidlo, princip jeho měření je založen na dvou komorách, které jsou rozděleny koženými membránami, čímž se vytvoří čtyři odměrné prostory. Tento typ průtokoměrů se používá v distribuční síti k měření množství topných plynů.

- **Pístová měřidla**

Používají se pro zjišťování proteklého množství kapalin. Měřenou kapalinou se střídavě naplňují a vyprazdňují odměrné prostory vymezené pístem a tělesem měřidla. Pístová měřidla jsou vhodná pro měření i velmi viskózních kapalin.

3.2.2 Hmotnostní měřidla

Hmotnostní průtok se určuje pomocí dvou metod a to metody přímé a metody nepřímé. Metoda nepřímá spočívá ve výpočtu hmotnostního průtoku z naměřeného objemového průtoku a hustoty. Jedná – li se o čistou kapalinu s malým rozdílem teplot, lze hustotu považovat za konstantní. U metody přímé používáme k zjišťování hmotnostního průtoku měřiče založené na Coriolisově jevu a tepelné hmotnostní průtokoměry.

- **Coriolisovy průtokoměry**

Princip Coriolisova průtokoměru spočívá ve využití Coriolisovy síly, která vzniká ve vibrujících nebo rotujících měřicích trubicích při průtoku média.[12]

Fázový posuv v rezonančním kmitání trubic, který vzniká jako důsledek působení Coriolisovy síly, je úměrný hmotnostnímu průtoku tekutiny trubicí a frekvence vlastních kmitů odpovídá hustotě tekutiny.[9] Nejrozšířenější provedení jsou se zakřivenou a přímou trubicí.

- **Tepelné hmotnostní průtokoměry [1, 8]**

V současnosti se tento typ průtokoměrů používá velmi často a to vlivem vývoje, který v této oblasti pokročil. Využívá závislosti výměny tepla na hmotnostním průtoku. Používané jsou hmotnostní termoanemometry a kalorimetrické hmotnostní senzory.

- Termoanemometr

Je to hmotnostní průtokoměr, jehož čidla teploty zasahují přímo do proudící tekutiny a vyhodnocuje se chladicí účinek nucené konvekce na vyhřívané čidlo.

- Kalorimetrický hmotnostní průtokoměr

Vyhodnocuje míru oteplení způsobenou prouděním hmoty.

3.2.3 Rychlostní měřidla

Rychlostní měřidla určují průtok na základě naměřené hodnoty místní nebo průměrné rychlosti, znalosti profilu proudění a průtočného průřezu. [1]

- **Průtokoměry turbínové a lopatkové**

Při pohybu měřeného média se roztáčí rotor turbíny a tento pohyb je dále mechanicky nebo elektronicky přenášen k dalšímu zpracování. [11]

- **Elektromagnetické a indukční průtokoměry [2, 7]**

Měření průtoku pomocí indukčních průtokoměrů se využívá u elektricky vodivých médií. Princip měření využívá elektromagnetické indukce, kde dochází ke vzniku napětí na vodiči, což je v tomto případě vodivá tekutina. Pokud dojde ke změně rychlosti média, mění se tím i velikost napětí. Velikost napětí, které se indukuje na vodiči, je přímo úměrná střední rychlosti proudění dané tekutiny.

- **Ultrazvukové průtokoměry [1, 6, 7, 8]**

Na rozdíl od indukčního průtokoměru tento průtokoměr nevyžaduje vodivost tekutin a také nezávisí na tlaku. Jedná se o bezkontaktní typ měřidla, u kterého nedochází k žádné tlakové ztrátě. Ultrazvukové průtokoměry lze rozdělit do dvou základních skupin:

- Průtokoměry využívající Dopplerův jev

Tento typ průtokoměrů pracuje na principu změny rychlosti, s jakou se ultrazvukové vlny šíří. Se změnou rychlosti proudění tekutiny dochází ke změně rychlosti ultrazvukových vln. Jedná se o takzvaný Dopplerův efekt.

- Průtokoměry s měřením doby šíření UZ – signálu

Ultrazvukové signály jsou vysílány ve formě impulsů a vyhodnocují se časové rozdíly při průchodu impulsů v obou směrech šíření.

- **Vírové průtokoměry**

U těchto průtokoměrů se využívá obtékané těleso, kolem kterého se vytvářejí víry. Přesněji za a před obtékaným tělesem dochází ke vzniku Karmánových vírů, jejichž četnost je pak úměrná rychlosti proudění tekutiny.

- **Průtokoměry s měřením rozdílů tlaků [1]**

Pro stanovení rychlosti proudění se využívá princip zachování energie v proudící tekutině vyjádřený Bernoulliho rovnicí. Při proudění tekutiny kinetická energie vyvolá vzrůst dynamického a pokles statického tlaku, přičemž celkový tlak zůstává zachován.

- Rychlostní sondy

Rychlostní sondy využívají závislosti dynamického tlaku proudícího média na rychlosti proudění.

- Prandtlova trubice

Je konstrukčně uzpůsobena tak, že měří tlak p_c i p_s v jednom místě.

- Pitotova trubice

Sonda snímá celkový tlak p_c , který je součtem tlaku statického p_s a dynamického p_d .

- Rotametry

Rotametr je plováчковý průtokoměr. Skládá se z plováčku a trubice. Průtokem média dochází ke zvednutí plováčku. Velikost průtoku je pak úměrná výšce zvednutí plováčku.

- Průřezová měřidla

Měření průtoku škrtícími orgány je dlouhou dobu nejpoužívanější provozní metodou měření průtoku kapalin i plynů ve velmi širokém rozmezí teplot a tlaků. Následující obsah se bude této problematice věnovat podrobněji.

4 Měření průtoku pomocí škrtících orgánů

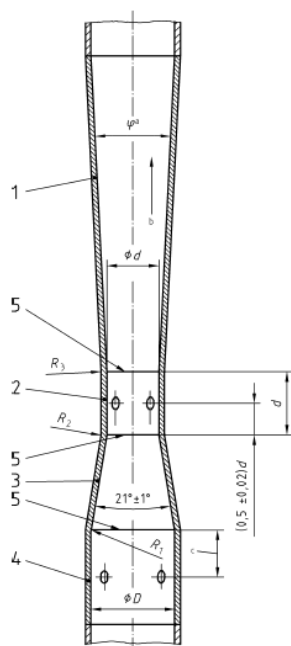
Metoda spočívá v seškrcení průtoku a to tím, že do potrubí zabudujeme primární prvek (clonu, dýzu, Venturiho trubici, Venturiho dýzu), což vyvolá změnu tlaku.

Průtok může být stanoven z naměřených hodnot tohoto tlakového rozdílu a ze znalostí proudící tekutiny, jakož i z okolností, za nichž je primární prvek použit.[3] Předpokládá se, že primární prvek je geometricky podobný primárnímu prvku, který je kalibrován a že podmínky použití jsou stejné.[3]

Jak již bylo zmíněno, je to metoda, která pracuje na principu rozdílů tlaků. Dojde k nárůstu kinetické energie, tedy ke zvýšení rychlosti a v souvislosti s principem zachování energie dojde k poklesu energie tlakové, tedy tlaku za primárním prvkem. Musí být splněna podmínka, která představuje zcela zaplněné potrubí.

4.1 Venturiho trubice

Venturiho trubice je zařízení, sestávající ze vstupního kuželovitého konfuzoru připojeného k válcovitému hrdlu, které je připojeno ke kuželovité rozšiřující se části, nazývané „difuzor“, viz obr. 3.1 [6]. V místě zúžení dojde k nárůstu rychlosti měřeného média a vznikne tak tlaková difference. V následující části, takzvaném difuzoru, se tlak vrací na hodnotu před zúžením, vlivem trvalé tlakové ztráty na ne úplně stejnou úroveň.



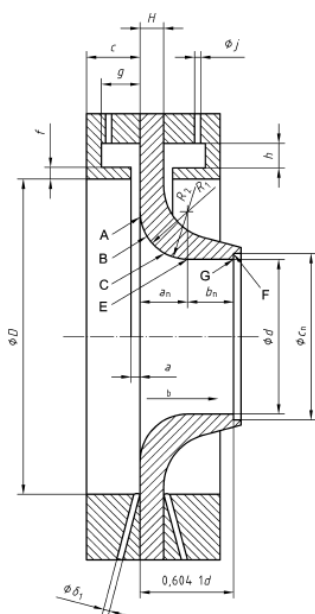
Legenda

- 1 kuželovitý difuzor E
- 2 válcovité hrdlo C
- 3 kuželovitý konfuzor B
- 4 vstupní válec A
- 5 spojovací roviny

Obr. 3.1 Geometrický profil klasické Venturiho trubice [6]

4.2 Dýza

Měřicí dýza je nátrubek, jehož vtoková hrana je zaoblena, výtoková hrana je ostrá.[1] Je považována za kompromis mezi Venturiho trubicí a clonou. Skládá se z konfuzoru se zaobleným profilem a válcovitého hrdla.[5] Část dýzy uvnitř je kruhová, viz obr. 3.2.[5]



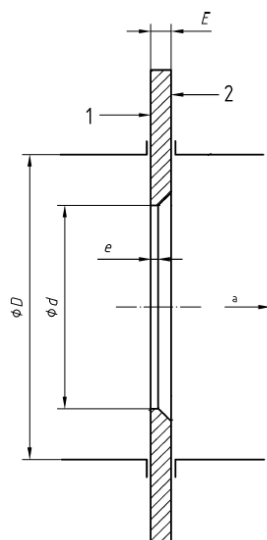
Legenda

- A rovinná vstupní část
- B, C konvergentní části, určené dvěma oblouky o délkách B a C
- E válcovité hrdlo
- F osazení
- G hrana
- H tloušťka zadní strany

Obr. 3.2 Dýza ISA 1932[5]

4.3 Clona

Obecný tvar clony je udán normou, která říká, že část clonového kotouče uvnitř potrubí musí být kruhového tvaru a soustředná s osou potrubí.[4] Existují však i jiné clony, které jsou rozlišných tvarů, viz kapitola 5 Clony.



Legenda

- 1 přední strana
- 2 zadní strana
- E tloušťka clonového kotouče
- e tloušťka otvoru clony
- a směr proudění

Obr. 3.3 Normalizovaný clonový kotouč [4]

4.4 Porovnání škrtících orgánů

Vzhledem k tomu, že se jedná o průtokoměry, které pracují na principu difference tlaku před a za primárním prvkem, lze je porovnat z hlediska tlakové ztráty. Tlaková ztráta vzniká třením a vířením před a za měřidlem a je vždy menší než měřená difference tlaku na škrtícím orgánu.[1]

- **Venturiho trubice**

Venturiho trubice má díky zabudovanému difuzoru za místem zúžení nejmenší tlakovou ztrátu. Z ekonomického hlediska je však Venturiho trubice drahá a tudíž se moc nepoužívá.[9]

- **Dýza**

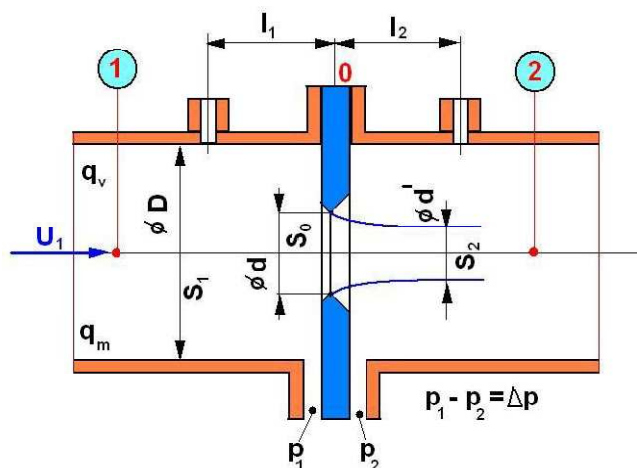
Dýza umožňuje měřit poměrně velké průtoky a oproti Venturiho trubici je levnější, na druhou stranu jsou ale méně přesné a způsobují větší tlakovou ztrátu.[9]

- **Clona**

U clony záleží na zabudování a také na průtokovém médiu a jeho čistotě. Clony jsou totiž náchylnější k opotřebení, může to být vlivem nečistot nebo částicemi média. V důsledku tohoto opotřebení může dojít k navýšení tlakových ztrát, popřípadě ke snížení, pokud se clona vyšlehá.

5 Clony

Jsou to primární prvky, které jsou vloženy do potrubí, jehož průřez je zcela zaplněn, za účelem stanovení průtoku tekutiny proudící potrubím.[4] Princip zabudování do potrubí clony je znázorněn na obrázku 4.1.



Obr. 4.1 Clona[2]

5.1 Typy clon

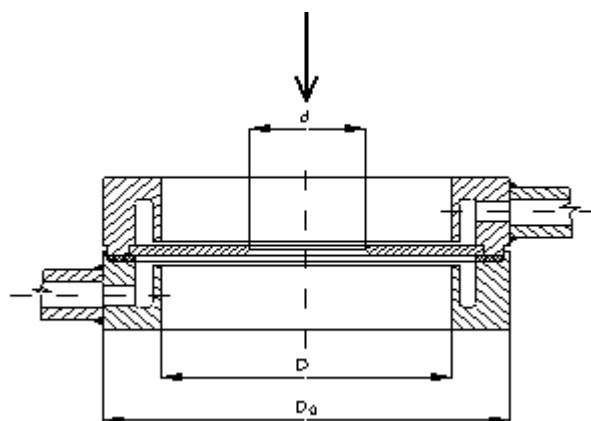
Následující kapitola je citována z [10]

- **Centrické clony**

Clona je tenký nerezový kotouč obvykle s kruhovým otvorem a je-li jeho střed v ose potrubí, nazývá se tato clona centrickou. Otvor může mít i jiný tvar než kruhový. Největší předností centrických clon je jejich konstrukční jednoduchost a jednoznačné definování normou ISO5167-2, kterými jsou předurčeny k nejširšímu využití ve všech oblastech měření průtoku.

- Centrické clony s komorovým odběrem tlakové difference

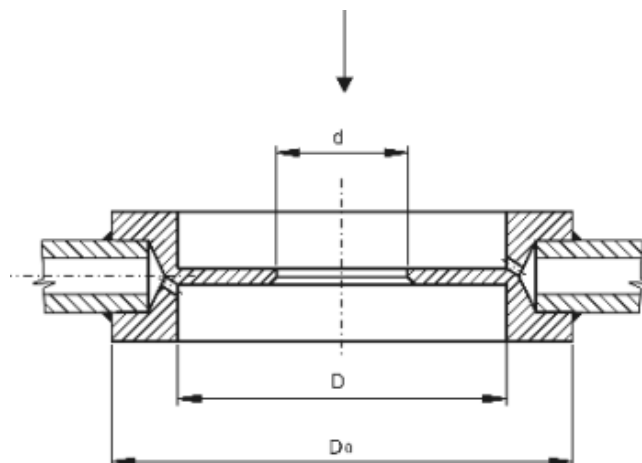
Hlavními částmi komorové clony je dvoudílná obruba s prstencovou komorou a clonový kotouč. Clonový kotouč je vyměnitelný. Schéma centrické clony s komorovým odběrem tlakové difference je znázorněno na obrázku 4.2.



Obr. 4.2 Schéma centrické clony s komorovým odběrem tlakové difference[10]

– Centrické clony s bodovým odběrem tlakové difference

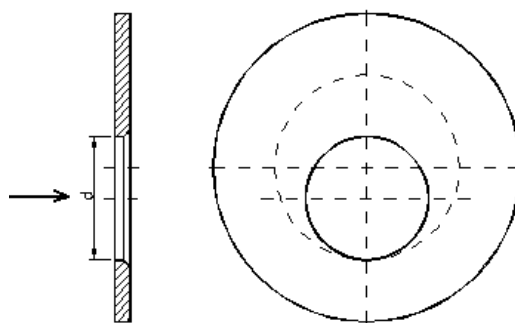
Tento typ clony má obrubu z jednoho kusu a kotouč je opracován přímo v tělese clony. Odběry tvoří jednotlivé (bodové) otvory před a za clonovým kotoučem. Použití bodové clony je vhodné na měřících místech s vyšším provozním tlakem a teplotou. Vzhledem k tomu, že je tato clona nerozebíratelná, má menší pravděpodobnost ke vzniku netěsností. Na obrázku 4.3 je znázorněna centrická clona s odběrem tlakové difference.



Obr. 4.3 Schéma centrické clony s odběrem tlakové difference [10]

• **Excentrické clony**

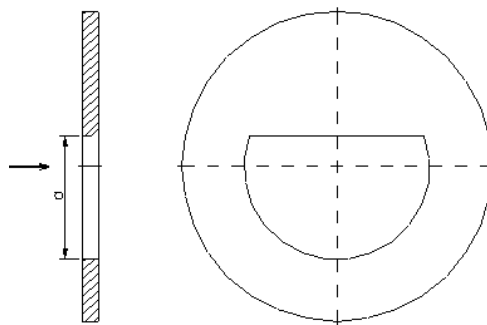
Obdoba klasické clony, clonový kotouč je umístěn excentricky a při orientaci průtočného průřezu ve spodní části vodorovného (šikmého) potrubí je umožněno proudění nečistot obsažených v měřené tekutině (viz obr. 4.4).



Obr. 4.4 Schéma excentrické clony [10]

• **Segmentové clony**

Omezení průtočného průřezu měřené tekutiny je realizováno segmentem kruhu, (deskou s přímou ostrou hranou vnořenou do kruhového průřezu), což popisuje obrázek 4.5. Při orientaci průtočného průřezu je ve spodní části vodorovného (šikmého potrubí) umožněno proudění nečistot obsažených v měřené tekutině.

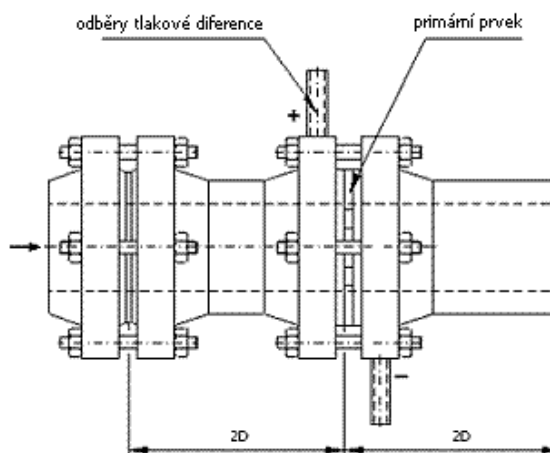


Obr. 4.5 Schéma segmentové clony [10]

- **Víceotvorové clony**

K přednostem víceotvorových clon patří kromě výhod centrických clon (jednoduchost, vyměnitelnost, spolehlivost) zejména menší zástavbová délka umožňující širší možnosti jejich využití. Jedná se o obdobu centrické clony, ve clonovém kotouči je však vyhotoveno více clonových otvorů. Průchod měřeného média několika zúženými průřezy snižuje oproti centrické cloně nároky na minimální přímé délky před a za clonou nezbytných pro správnou funkci tohoto typu měřidel.

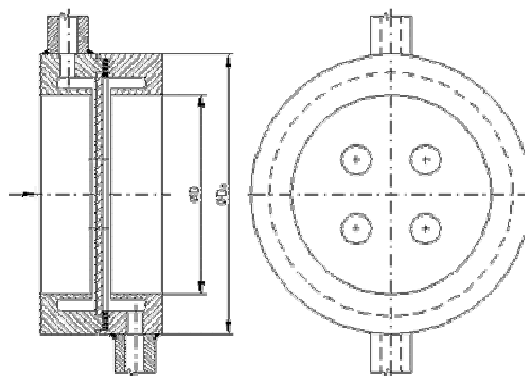
Víceotvorová clona jako stanovené měřidlo se vyrábí v provedení měřících tratí obsahujících kromě zabudované clony i uklidňující úsek potrubí před clonou zajišťující přívod stabilizovaného proudu tekutiny, což ukazuje obrázek 4.6.



Obr. 4.6 Schéma měřící tratě [10]

- Víceotvorová clona s komorovým odběrem tlakové difference

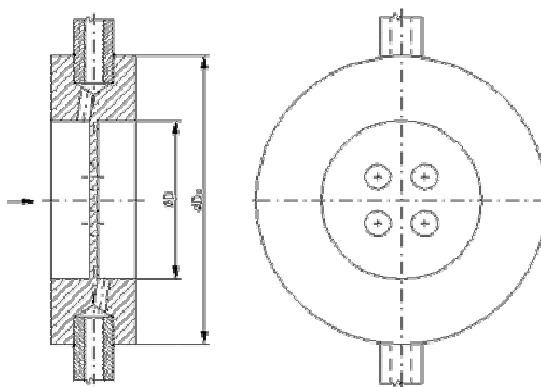
Hlavními částmi komorové víceotvorové clony je dvoudílná obruba s prstencovou komorou a clonový kotouč. Clonový kotouč je sevřen mezi dvěma díly obruby a utěsněn těsněním. Z obrub je vyveden odběr diferenčního tlaku, viz obr 4.7. Clonový kotouč je vyměnitelný.



Obr. 4.7 Schéma víceotvorové clony s komorovými odběry tlakové difference [10]

– Víceotvorová clona s bodovým odběrem tlakové difference

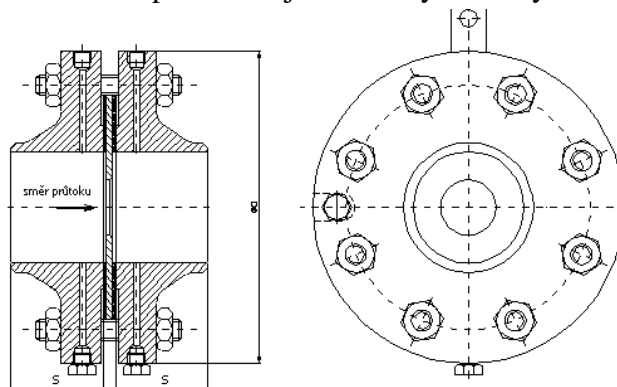
Tento typ clony má obrubu z jednoho kusu a kotouč je opracován přímo v tělese clony, viz obr. 4.8. Tato clona je nerozebíratelná a má menší pravděpodobnost ke vzniku netěsností. Kotouč bodové clony nelze vyměnit.



Obr. 4.8 Schéma víceotvorové clony s bodovým odběrem tlakové difference [10]

• **Odběrové příruby s centrickou clonou**

Poskytují ekonomickou a progresivní metodu zabudování clonového měření proteklého množství. Tím, že odběry diferenčního tlaku jsou zabudovány přímo v těle příruby, není nutné dodávat samostatně obruby clony nebo odvrátat odběry tlaku do stěny potrubí, viz obr. 4.9. Hlavní komponentem je centrický clonový kotouč.



Obr. 4.9 Schéma sestavy clony s protipřírubama [10]

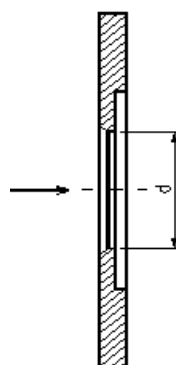
- **Speciální clony**

- Přestavitelná segmentová clona

Používají se u předávacích stanic plynu s nepřetržitým provozem. Segmentová clona umožňuje měnit rozsah měřených průtoků změnou průtočného průřezu za provozu (změnou hloubky zasunutí segmentu). Tím se průběžně mění vztah mezi tlakovou diferencí a průtokem.

- Clona s kuželovým vstupem (dříve označována jako kónická clona)

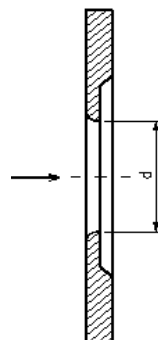
Používá se u viskózních tekutin (oleje) nebo u provozních režimů při malých Reynoldsových číslech. Obdoba klasické clony, vstup do měřicího otvoru je kuželovitě zkosen, viz obrázek 4.10.



Obr. 4.10 Schéma clony s kuželovým vstupem [10]

- Čtvrtkruhová clona (dříve označována jako čtvrtkruhová dýza Koenneckova)

Použití je shodné se clonou s kuželovým vstupem. Rozdíl je ve vstupu do měřicího otvoru, který je u této clony zaoblený ve tvaru čtvrt kružnice, viz obr. 4.11.



Obr. 4.11 Schéma čtvrtkruhové clony[10]

6 Návrh měření průtoku přehřáté páry a napájecí vody pomocí clon

V celé kapitole se vychází z norem ČSN EN ISO 5167-1 [3], 5167-2 [4].

Princip metody měření průtoku spočívá v zabudování clony do potrubí, v němž plným průřezem protéká tekutina. Zabudování clony způsobí rozdíl statických tlaků mezi přední a zadní stranou clony.

6.1 Postup výpočtu

Hlavním rozměrem, který je nutno spočítat, je průměr škrťacího otvoru d . Při výpočtu se vychází z technologických parametrů připojovacího místa. Hodnoty parametrů pro vlastní návrh jsou uvedeny v tabulce 4.

Tabulka 4

	tlak – p_I	teplota- t_I	D_{20}	α_d	α_D	q_m	Δp
	[MPa]	[°C]	[mm]	[1/K]	[1/K]	[t/h]	[kPa]
přehřátá pára	18,1	575	213	14,625 E-6	14,625 E-6	300	350
napájecí voda	22	249	267,9	13,145 E-6	13,145 E-6	560	60

6.1.1 Hmotnostní průtok

$$q_m = \frac{C}{\sqrt{1-\beta}} \cdot \varepsilon \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta p \rho_1} \quad [\text{kg/s}] \quad (1)$$

kde

C	je součinitel průtoku	[1]
β	poměr průměrů $\beta = \frac{d}{D}$	[1]
ε	součinitel expanze	[1]
d	průměr clony	[m]
Δp	diferenční tlak	[Pa]
ρ_1	hustota tekutiny	[kg/m³]

6.1.2 Součinitel průtoku

Součinitel průtoku pro clonu je dán Reader - Harris/Gallagherovou (1998) rovnicí:

$$C = 0,5961 \cdot 0,0261 \cdot \beta^2 - 0,216 \cdot \beta^2 + 0,000521 \cdot \left(\frac{10^6 \cdot \beta}{\text{Re}_D} \right)^{0,7} +$$

$$+ (0,0188 + 0,0063 \cdot A) \cdot \beta^{3,5} \cdot \left(\frac{10^6}{\text{Re}_D} \right)^{0,3} + \quad [1] \quad (2)$$

$$+ (0,043 + 0,080 \cdot e^{-10 \cdot L_1} - 0,123 \cdot e^{-7 \cdot L_1}) \cdot (1 - 0,11 \cdot A) \cdot \frac{\beta^4}{1 - \beta^4} -$$

$$- 0,031 \cdot (M_2' - 0,8 \cdot M_2'^{1,1}) \cdot \beta^{1,3}$$

kde

$$\beta \text{ je poměr průměrů } \beta = \frac{d}{D} \quad [1]$$

$$\text{Re}_D \text{ Reynoldsovo číslo vypočtené vzhledem k } D \quad [1]$$

- L_1 podíl vzdálenosti předního odběru tlaku od přední strany clonového kotouče a průměru potrubí [1]
- L_2' podíl vzdálenosti zadního odběru tlaku od zadní strany clonového kotouče a průměru potrubí [1]

$$M_2' = \frac{2 \cdot L_2'}{1 - \beta} \quad [1] \quad (3)$$

$$A = \left(\frac{19000 \cdot \beta}{\text{Re}_D} \right)^{0,8} \quad [1] \quad (4)$$

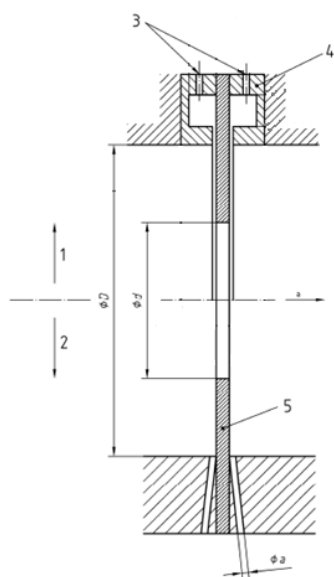
$$\text{Re}_D = \frac{4 \cdot q_m}{\pi \cdot \mu_1 \cdot D} \quad [1] \quad (5)$$

kde

μ_1 je dynamická viskozita tekutiny $[kg/m \cdot s]$

6.1.2.1 Návrh způsobu odběru diferenčního tlaku

Pro každou clonu musí být zabudován alespoň jeden odběr tlaku před a jeden odběr tlaku za clonou v některém z normalizovaných míst, což jsou odběry ve vzdálenostech D a $D/2$, přírubový nebo koutový odběr. Je přípustné použít jedinou clonu s několika páry odběrů tlaku, vhodných pro různé typy normalizovaných clonových měřidel, ale aby se zabránilo jejich vzájemnému narušování, několik odběrů tlaku na téže straně clonového kotouče musí být pootočeno alespoň o 30° . Reader – Harris/Gallagherova rovnice (1988) – rovnice (2), platí pouze pro uspořádání normalizovaných odběrů tlaku. Pro tento případ je zvolena clona s koutovým odběrem s bodovými odběry tlaku, viz obr. 5.1.



Legenda

- 1 komorový odběr s prstencovou štěrbinou
- 2 bodové odběry
- 3 odběry tlaku
- 4 komorový prstenec
- 5 clonový kotouč
- a směr proudění
- a průměr bodového odběru

Obr. 5.1 Koutové odběry [4]

Pro koutové odběry je $L_1 = L_2' = 0 \Rightarrow$ rovnice (2) se zjednoduší na tvar:

$$C = 0,5961 \cdot 0,0261 \cdot \beta^2 - 0,216 \cdot \beta^2 + 0,000521 \cdot \left(\frac{10^6 \cdot \beta}{\text{Re}_D} \right)^{0,7} +$$

$$+ (0,0188 + 0,0063 \cdot A) \cdot \beta^{3,5} \cdot \left(\frac{10^6}{\text{Re}_D} \right)^{0,3} + \quad [1] \quad (6)$$

$$+ (0,043 + 0,080 - 0,123) \cdot (1 - 0,11 \cdot A) \cdot \frac{\beta^4}{1 - \beta^4}$$

6.1.3 Součinitel expanze

Součinitel expanze se vypočítá pomocí empirického vzorce

$$\varepsilon = 1 - (0,351 + 0,256 \cdot \beta^4 + 0,93 \cdot \beta^8) \cdot \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{1/\kappa} \right] \quad [1] \quad (7)$$

kde

κ je izentropický koeficient [1]

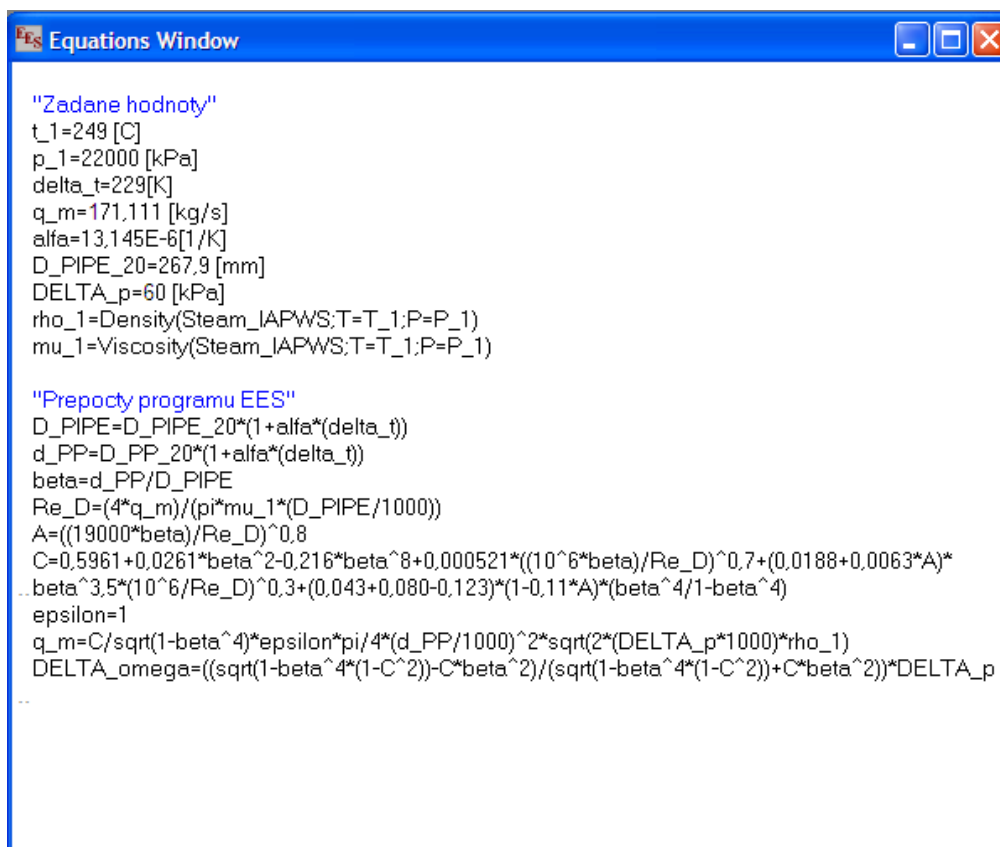
6.2 Výpočet pro měření průtoku napájecí vody pomocí clony pro dva snímače diferenčního tlaku s různými rozsahy

Zadané hodnoty jsou uvedeny v tabulce 4. Při provozu kotle v elektrárně může dojít k náhlému zvýšení množství proudícího média, tudíž při výpočtech uvažujeme se 110% provozního průtoku. Clonový kotouč se předimenzuje a předejde se případným komplikacím.

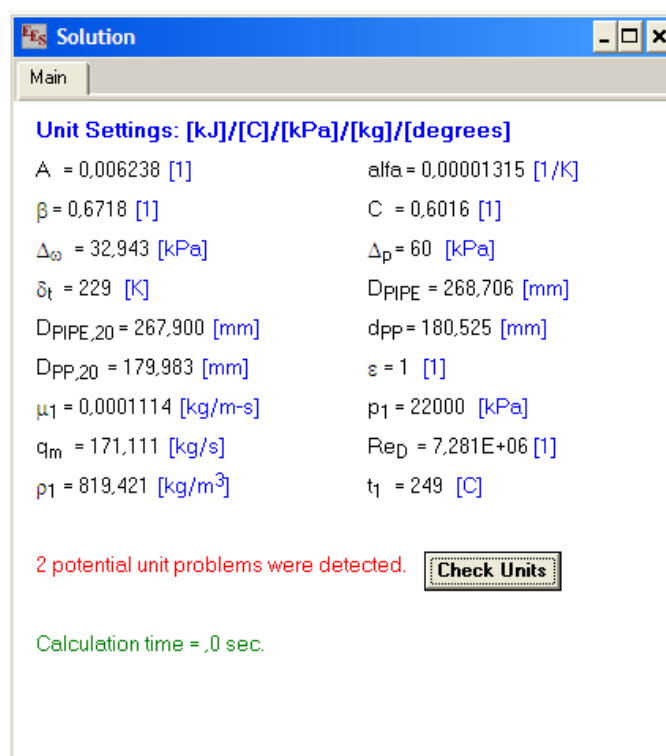
Výpočty se provádí pro parametry:

- 110 % průtoku $\Rightarrow q_m = 616 [t/h]$ a $\Delta p = 60 [kPa]$
- 110 % průtoku $\Rightarrow q_m = 616 [t/h]$ a $\Delta p = 350 [kPa]$

Je počítáno se dvěma různými hodnotami diferenčního tlaku, aby se zjistil vliv seškrcení na návrh clony. Veškeré výpočty jsou prováděny v programu EES. Vzorce dle normy jsou zadávány do programu EES, který následně vypočítal hledané hodnoty, viz obr. 5.2, 5.3 a tabulka 5.



Obr. 5.2 Ukázka okna EES se zadanými vzorci



Obr. 5.3 Ukázka okna EES s výslednými hodnotami

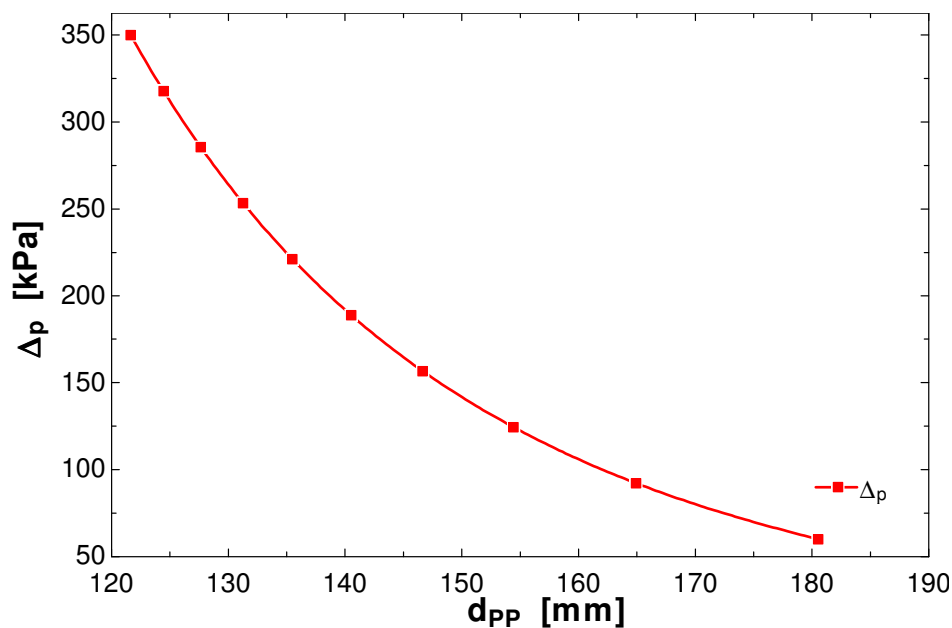
Tabulka 5

Veličiny	$\Delta p=60$ [kPa]	$\Delta p=350$ [kPa]	Jednotky
	110 % průtoku	110 % průtoku	
Zadané hodnoty			
Δp	60	350	[kPa]
p_1	22000	22000	[kPa]
α	0,00001315	0,00001315	[1/K]
D_{20}	267,9	267,9	[mm]
q_m	171,111	171,111	[kg/s]
ε	1	1	[1]
t_1	249	249	[°C]
Δt	229	229	[°C]
ρ_1	819,421	819,421	[kg/m ³]
μ_1	0,0001114	0,0001114	[kg/m.s]
Vypočtené hodnoty			
Re_D	7,281E+06	7,281E+0,6	[1]
C	0,6016	0,6018	[1]
D	268,706	268,706	[mm]
A	0,006238	0,00458	[1]
β	0,6718	0,4527	[1]
d	180,525	121,636	[mm]
d_{20}	179,983	121,271	[mm]

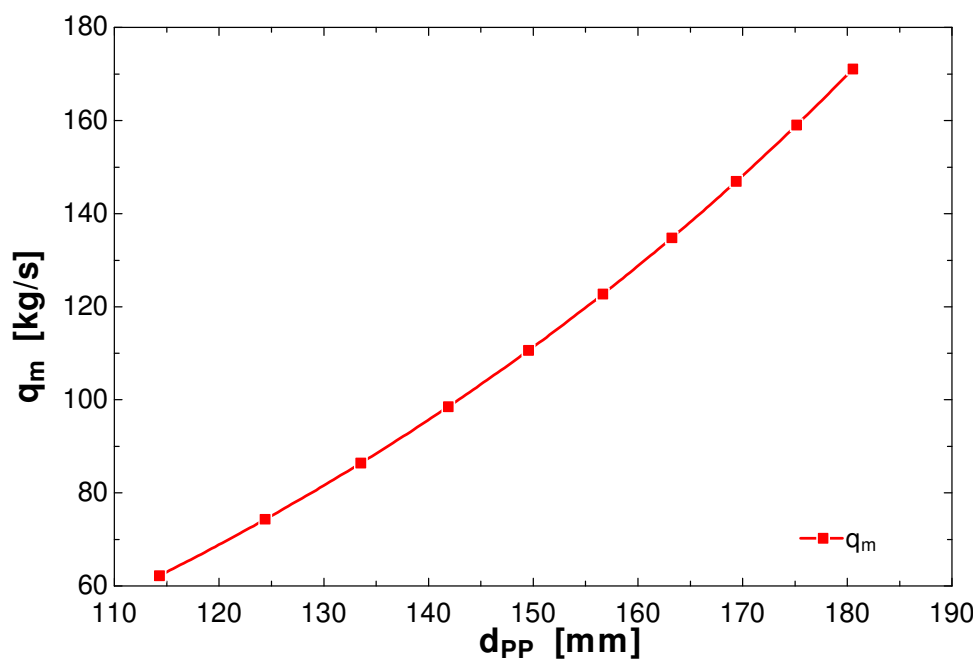
Z výpočtu byly stanoveny průměry vnitřního kotouče clony:

- Pro $\Delta p = 60$ [kPa] je $d = 180,525$ [mm]
- Pro $\Delta p = 350$ [kPa] je $d = 121,636$ [mm]

Na grafech 1 a 2, uvedených níže, je zřejmé, jak se průměr škrťacího otvoru d mění v závislosti na nárůstu tlakové ztráty a na změně průtoku.



Graf 1. Závislost průměru clony na diferenčním tlaku



Graf 2. Závislost průměru clony na hmotnostním průtoku

6.2.1 Stanovení snímače diferenčního tlaku

Chceme – li vhodně stanovit rozsah snímače tlakové difference, musí být zvolen diferenční tlak pro navrženou clonu a minimální průtok za účelem kontroly konstantnosti průtokového součinitele a v závislosti na Reynoldsově čísle. V tomto případě je počítáno s minimálním průtokem v rozsahu 40% zadané hodnoty. Na grafu 3 je patrné, jak se se změnou průtoku mění diferenční tlak. Z výše vypočteného průměru d je zjištěn diferenční tlak pro 40 % průtoku, viz tabulka 6 a provedena kontrola, zda vyhovuje požadavkům normy.

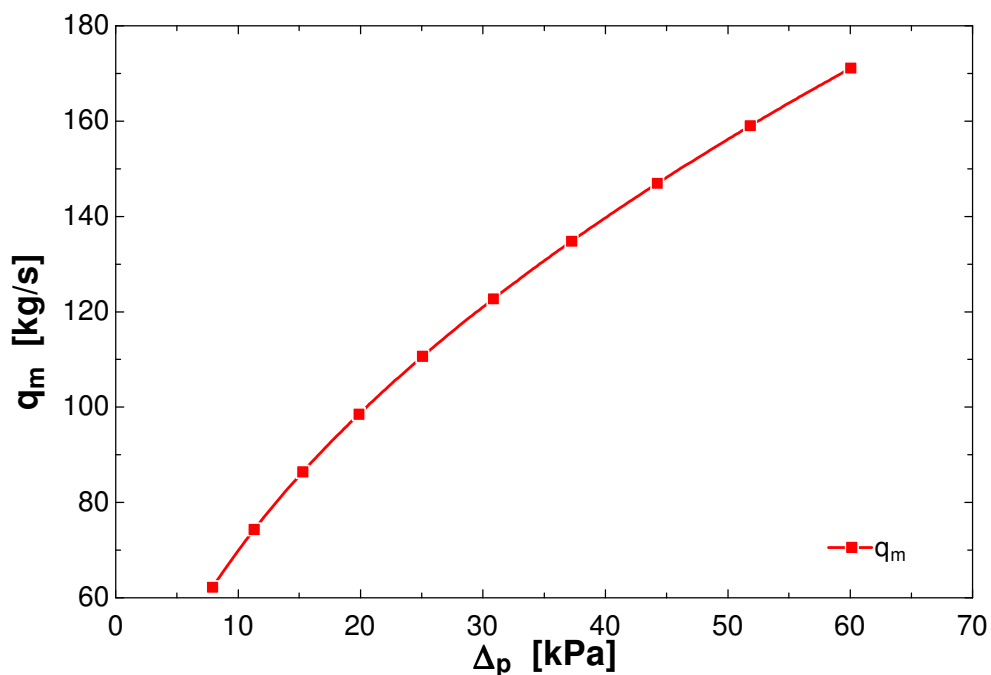
Tabulka 6

Veličiny	$\Delta p=60$ [kPa]	$\Delta p=350$ [kPa]	Jednotky
	40 % průtoku	40 % průtoku	
Zadané hodnoty			
d	180,525	121,636	[mm]
p_1	22000	22000	[kPa]
α	0,00001315	0,00001315	[1/K]
D_{20}	267,9	267,9	[mm]
q_m	62,222	62,222	[kg/s]
ε	1	1	[1]
t_1	249	249	[°C]
Δt	229	229	[°C]
ρ_1	819,421	819,421	[kg/m ³]
μ_1	0,0001114	0,0001114	[kg/m.s]
Vypočtené hodnoty			
Re_D	2,648E+06	2,648E+0,6	[1]
C	0,6026	0,6021	[1]
D	268,706	268,706	[mm]
d_{20}	179,983	121,271	[mm]
A	0,01401	0,01022	[1]
β	0,6718	0,4527	[1]
Δp	7,907	46,234	[kPa]

Výsledné hodnoty je nutné porovnat s rozmezím stanoveným normou. Norma udává pro normalizovanou clonu s koutovými odběry tyto meze:

- $d \geq 12,5[mm]$
- $50[mm] \leq D \leq 1000[mm]$
- $0,1 \leq \beta \leq 0,75$
- $Re_D \geq 5000$ pro $0,1 \leq \beta \leq 0,56$
- $Re_D \geq 16000 \cdot \beta^2$ pro $\beta > 0,56$

Po porovnání hodnot v tabulce 5 a 6 je zřejmé, že pro zadané parametry lze clonu sestavit v obou případech seškrčení, tedy že vyhovují hodnoty diferenčního tlaku $\Delta p = 60[kPa]$ i $\Delta p = 350[kPa]$. Z ekonomického hlediska je však žádoucí menší seškrčení. Z tohoto důvodu je vhodnější návrh pro $\Delta p = 60[kPa]$.



Graf 3 Závislost diferenčního tlaku na hmotnostním průtoku

Pro daný rozsah diferenčního tlaku je navržen snímač diferenčního tlaku Rosemount 3015S-MULTIVARIABLE.

6.2.2 Nejistoty

- Nejistota součinitele průtoku**

Za předpokladu, že β , D , Re_D , Ra_D jsou známy bez chyby, je relativní nejistota hodnoty C pro koutový odběr rovna:

- $(0,7 - \beta)[\%]$ pro $0,1 \leq \beta < 0,2$
- $0,5[\%]$ pro $0,2 \leq \beta \leq 0,6$
- $(1,667 \cdot \beta - 0,5)[\%]$ pro $0,6 < \beta \leq 0,75$

Pro výše vypočítané hodnoty poměru průměrů β a součinitele průtoků C byly zjištěny pomocí programu EES nejistoty součinitele průtoku. Příklad zadávání vzorce v EES je znázorněn na obrázku 5.4. Hodnoty jednotlivých nejistot součinitele průtoku jsou uvedeny v tabulce 7.

Tabulka 7

Veličiny	$\Delta p=60$ [kPa]	$\Delta p=350$ [kPa]	Jednotky
	110 % průtoku	110 % průtoku	
β	0,6718	0,4527	[1]
C	0,6016	0,6018	[1]
<i>nejistota C</i>	0,6199	0,5	[%]

Při minimálním průtoku se hodnoty nejistoty součinitele průtoku C změnilly dle tabulky 8. Lze považovat součinitele průtoku C za konstantní.

Tabulka 8

Veličiny	$\Delta p=60$ [kPa]	$\Delta p=350$ [kPa]	Jednotky
	40 % průtoku	40 % průtoku	
β	0,6718	0,4527	[1]
C	0,6026	0,6021	[1]
nejistota C	0,6198	0,5	[%]

- Nejistota součinitele expanze**

Za předpokladu, že β , $\Delta p/p$ a κ jsou známy bez chyby, je relativní nejistota v procentech hodnoty ε rovna:

$$3,5 \cdot \frac{\Delta p}{\kappa \cdot p_1} [\%] \quad (8)$$

kde

Δp je	diferenční tlak	[kPa]
ρ_1	hustota napájecí vody	[kg / m ³]
κ	izoentropický exponent	[1]

Program EES zjistil nejistoty součinitele expanze. Příklad zadávání vzorce v EES je znázorněn na obrázku 5.4 a výsledné rozměry veličin na obrázku 5.5. Hodnoty jednotlivých nejistot součinitele expanze pro 110 % a 40 % průtok jsou uvedeny v tabulce 9 a 10.

Tabulka 9

Veličiny	$\Delta p=60$ [kPa]	$\Delta p=350$ [kPa]	Jednotky
	110 % průtoku	110 % průtoku	
Δp	60	350	[kPa]
p_1	22000	22000	[kPa]
κ	1,481	1,481	[1]
ε	1	1	[1]
nejistota ε	0,006446	0,0376	[%]

Tabulka 10

Veličiny	$\Delta p=60$ [kPa]	$\Delta p=350$ [kPa]	Jednotky
	40 % průtoku	40 % průtoku	
Δp	7,907	46,234	[kPa]
p_1	22000	22000	[kPa]
κ	1,481	1,481	[1]
ε	1	1	[1]
nejistota ε	0,0008494	0,004967	[%]


```

Equations Window

"Vypocet nejistot"
"Nejistota soucinitele prutoku"
Function nejistota_fceC(d_pp:D_PIPE;beta)
  if beta<0,6 then
    nejistota_fceC=0,5
  else
    nejistota_fceC=(1,667*beta-0,5)
  endif
End
nejistota_C=nejistota_fceC(d_pp:D_PIPE;beta)
"Nejistota soucinitele expanze"
nejistota_epsilon=3,5*(DELTA_p/(kappa*p_1))

"Zadane hodnoty"
t_1=249 [C]
p_1=22000 [kPa]
delta_t=229[K]
q_m=171,111 [kg/s]
alfa=13,145E-6[1/K]
D_PIPE_20=267,9 [mm]
DELTA_p=60 [kPa]
rho_1=Density(Steam_IAPWS;T=T_1;P=P_1)
mu_1=Viscosity(Steam_IAPWS;T=T_1;P=P_1)
cv_1=Cv(Steam_IAPWS;T=T_1;P=P_1)
cp_1=Cp(Steam_IAPWS;T=T_1;P=P_1)

"Prepocty programu EES"
kappa=cp_1/cv_1
D_PIPE=D_PIPE_20*(1+alfa*(delta_t))
d_PP=D_PP_20*(1+alfa*(delta_t))
beta=d_PP/D_PIPE
Re_D=(4*q_m)/(pi*mu_1*(D_PIPE/1000))
A=((19000*beta)/Re_D)^0,8
C=0,5961+0,0261*beta^2-0,216*beta^8+0,000521*((10^6*beta)/Re_D)^0,7+(0,0188+0,0063*A)*
beta^3,5*(10^6/Re_D)^0,3+(0,043+0,080-0,123)*(1-0,11*A)*(beta^4/1-beta^4)
epsilon=1
q_m=C/sqrt(1-beta^4)*epsilon*pi/4*(d_PP/1000)^2*sqrt(2*(DELTA_p*1000)*rho_1)
DELTA_omega=((sqrt(1-beta^4*(1-C^2))-C*beta^2)/(sqrt(1-beta^4*(1-C^2))+C*beta^2))*DELTA_p

```

Obr. 5.4 Ukázka okna EES se zadanými vzorci pro přepočet nejistot

Solution

Main | nejistota_fceC

Unit Settings: [kJ]/[C]/[kPa]/[kg]/[degrees]

A = 0,006238 [1]	alfa = 0,00001315 [1/K]
β = 0,6718 [1]	C = 0,6016 [1]
cp ₁ = 4,661 [[kJ/kg-K]]	cv ₁ = 3,148 [[kJ/kg-K]]
Δ_{∞} = 32,943 [kPa]	Δ_p = 60 [kPa]
δ_t = 229 [K]	D _{PIPE} = 268,706 [mm]
D _{PIPE,20} = 267,900 [mm]	d _{pp} = 180,525 [mm]
D _{pp,20} = 179,983 [mm]	ε = 1 [1]
κ = 1,481 [1]	μ_1 = 0,0001114 [kg/m-s]
nejistota _C = 0,6199 [%]	nejistota _{ε} = 0,006446 [%]
p ₁ = 22000 [kPa]	q _m = 171,111 [kg/s]
Re _D = 7,281E+06 [1]	ρ_1 = 819,421 [kg/m ³]
t ₁ = 249 [C]	

7 potential unit problems were detected. **Check Units**

Calculation time = ,0 sec.

Obr. 5.5 Ukázka okna EES s výslednými hodnotami

6.2.3 Porovnání návrhu clony vzhledem k velikosti tlakové ztráty

Tlaková ztráta clony je přibližně závislá na diferenčním tlaku Δp podle rovnice

$$\Delta \omega = \frac{\sqrt{1 - \beta^4 \cdot (1 - C^2)} - C \cdot \beta^2}{\sqrt{1 - \beta^4 \cdot (1 - C^2)} + C \cdot \beta^2} \cdot \Delta p \text{ [Pa]} \quad (9)$$

kde

C	je součinitel průtoku	[1]
β	poměr průměrů	[1]
Δp	diferenční tlak	[1]

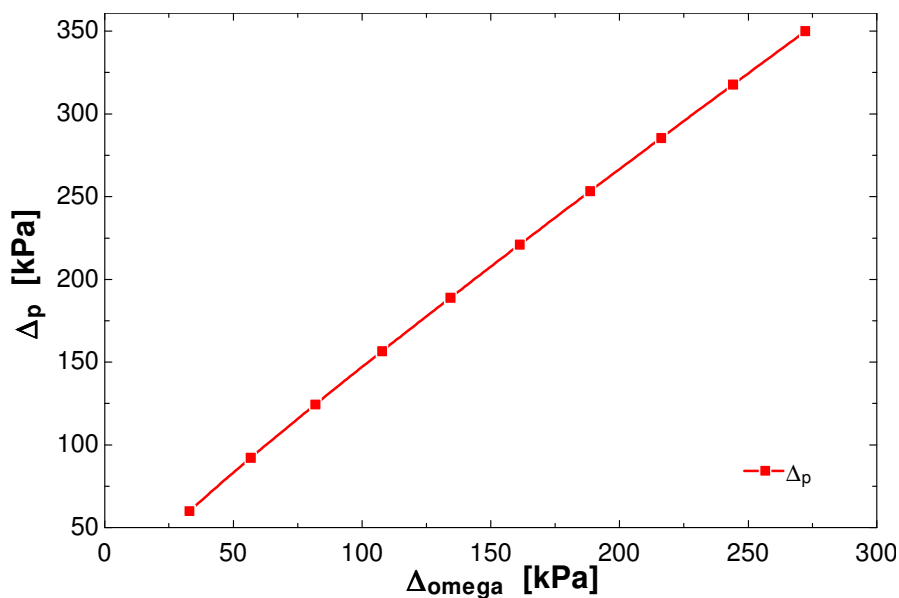
Tato tlaková ztráta je rozdíl statického tlaku mezi tlakem měřeným u stěny na přední straně clony v průřezu, kde vliv dynamického tlaku na clonový kotouč je ještě zanedbatelný (přibližně D před clonou) a tlakem měřeným za clonou v místě, kde obnova statického tlaku expanzí proudu smí být považována již za úplnou (přibližně $6D$ za clonou).

Pomocí programu EES je tlaková ztráta vypočítána pro všechny parametry. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulce 11.

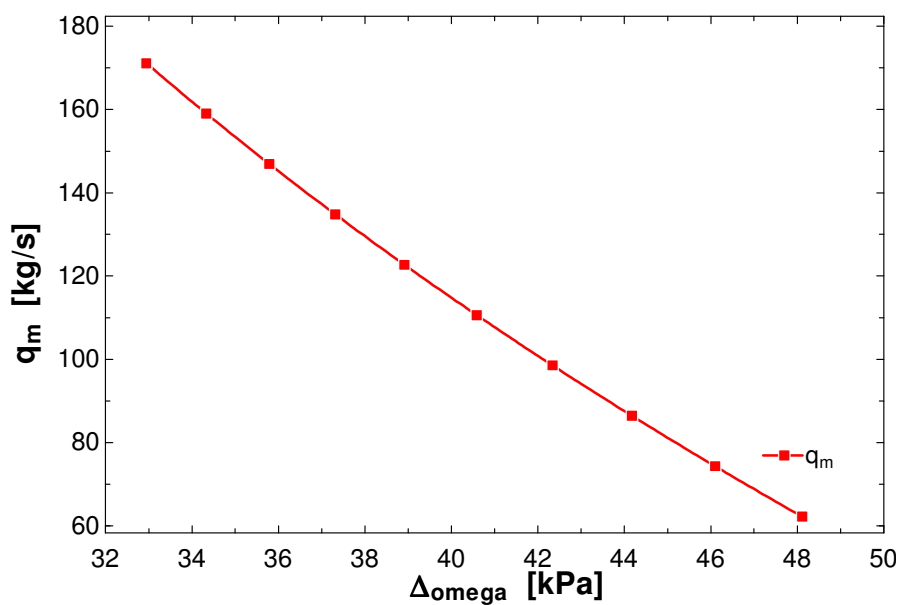
Tabulka 11

Veličiny	$\Delta p=60$ [kPa]		$\Delta p=350$ [kPa]		Jednotky
	110 % průtoku	40 % průtoku	110 % průtoku	40 % průtoku	
q_m	171,111	62,222	171,111	62,222	[kg/s]
β	0,6718	0,6718	0,4527	0,4527	[1]
C	0,6016	0,6026	0,6018	0,6021	[1]
Δp	60	7,907	350	46,234	[kPa]
$\Delta \omega$	32,943	4,337	272,222	35,955	[kPa]

Následující grafy 4 a 5 popisují vliv hmotnostního průtoku a diferenčního tlaku. Vyplývá z nich, že tlaková ztráta se zvyšujícím se diferenčním tlakem narůstá. Z ekonomického hlediska je vhodné při návrhu clony optimalizovat tlakovou ztrátu. Z tohoto důvodu se volí v rámci technických možností optimální diferenční tlak.



Graf 4. Závislost tlakové ztráty na diferenčním tlaku



Graf 5. Závislost tlakové ztráty na hmotnostním průtoku

6.3 Výpočet měření průtoku přehřáté pomoci clony pro dva snímače diferenčního tlaku s různými rozsahy

Zadané hodnoty jsou uvedeny v tabulce 4. Při výpočtu je postupováno stejným způsobem, jako tomu bylo u návrhu měření napájecí vody pomocí clony.

Výpočty se provádí pro parametry:

- 110 % průtoku $\Rightarrow q_m = 330 \text{ [t/h]}$ a $\Delta p = 350 \text{ [kPa]}$
- 110 % průtoku $\Rightarrow q_m = 330 \text{ [t/h]}$ a $\Delta p = 60 \text{ [kPa]}$

Pro napájecí vodu je součinitel expanze $\varepsilon = 1$, pro přehřátou páru je nutno zjistit součinitel expanze pomocí empirického vzorce (7). Izoentropický koeficient κ pro páru

Ize určit z internetových stránek <http://www.spiraxsarco.com>. Na této adrese se nachází program, který ze známých hodnot tlaku a teploty vypočte velikost κ , viz obrázek 5.6. Na obrázku 5.7, je pak ukázka okna programu EES. V tabulce 12 jsou výsledné hodnoty.

Pressure	18.1	MPa absolute
Superheat Temperature	575	°C
<input type="button" value="Calculate"/> <input type="button" value="Reset"/> <input type="button" value="Print"/>		
Saturation Temperature	357.496	°C
Degrees Superheat	217.504	°C
Specific Enthalpy of Water (h_f)	1.73638E06	J/kg
Specific Enthalpy of Evaporation (h_{fg})	769283	J/kg
Specific Enthalpy of Superheated Steam (h)	3.48537E06	J/kg
Density of Steam	51.4427	kg/m³
Specific Volume of Steam (v)	0.0194391	m³/kg
Specific Entropy of Water (s_f)	3878.05	J/kg K
Specific Entropy of Evaporation (s_{fg})	1219.83	J/kg K
Specific Entropy of Superheated Steam (s)	6485.77	J/kg K
Specific Heat of Steam (c_v)	1925.35	J/kg K
Specific Heat of Steam (c_p)	2772.26	J/kg K
Speed of sound	673.266	m/s
Dynamic Viscosity of Steam	3.27190E-05	Pa s
Isentropic Coefficient (κ)	1.29242	
Compressibility Factor of Steam	0.898856	

Obr. 5.6 Ukázka okna programu pro výpočet izoentropického součinitele

```

EES Equations Window
"Zadane hodnoty"
t_1=575 [C]
p_1=18100 [kPa]
delta_t=555[C]
q_m=91.667[kg/s]
alfa=14.625E-6[1/K]
D_PIPE_20=213 [mm]
kappa=1.29242[1]
DELTA_p=350 [kPa]
rho_1=Density(Steam_IAPWS;T=T_1;P=P_1)
mu_1=Viscosity(Steam_IAPWS;T=T_1;P=P_1)

"Prepočet EES programu"
p_2=p_1-DELTA_p
D_PIPE=D_PIPE_20*(1+alfa*(delta_t))
d_PP=D_PP_20*(1+alfa*(delta_t))
beta=d_PP/D_PIPE
epsilon=1-(0.351+0.256*beta^4+0.93*beta^8)*(1-(p_2/p_1)^(1/kappa))
Re_D=(4*q_m)/(pi*mu_1*(D_PIPE/1000))
A=((19000*beta)/Re_D)^0.8
C=0.5961+0.0261*beta^2-0.216*beta^8+0.000521*((10^6*beta)/Re_D)^0.7+(0.0188+0.0063*A)*
beta^3.5*(10^6/Re_D)^0.3+(0.043+0.080-0.123)*(1-0.11*A)*(beta^4/1-beta^4)
q_m=C/sqrt(1-beta^4)*epsilon*pi/4*(d_PP/1000)^2*sqrt(2*(DELTA_p*1000)*rho_1)
DELTA_omega=((sqrt(1-beta^4*(1-C^2))-C*beta^2)/(sqrt(1-beta^4*(1-C^2))+C*beta^2))*DELTA_p

```

Obr. 5.7 Ukázka okna EES se zadanými vzorci

Tabulka 12

Veličiny	$\Delta p=350$ [kPa]	$\Delta p=60$ [kPa]	Jednotky
	110 % průtoku	110 % průtoku	
Zadané hodnoty			
Δp	350	60	[kPa]
p_1	18100	18100	[kPa]
α	0,00001463	0,00001463	[1/K]
D_{20}	213	213	[mm]
q_m	91,667	91,667	[kg/s]
κ	1,29242	1,29242	[1]
t_1	575	575	[°C]
Δt	555	555	[°C]
ρ_1	51,391	51,391	[kg/m ³]
μ_1	0,00003272	0,00003272	[kg/m.s]
Vypočtené hodnoty			
Re_D	1,661E+07	1,661E+0,6	[1]
C	0,5892	0,482	[1]
D	214,729	214,729	[mm]
A	0,003578	0,004258	[1]
β	0,7652	0,9511	[1]
ε	0,9918	0,997	[1]
d	164,302	204,222	[mm]
d_{20}	162,979	202,578	[mm]

Rozmezí normy jsou stejné jako v případě návrhu napájecí vody. Z výsledných hodnot bylo zjištěno, že hodnoty β jsou mimo rozsah stanovený normou. V případě výpočtů clon se striktně dodržují povolené součinitele β . Při malém překročení součinitele β bude clona zřejmě bezproblémově měřit s poněkud vyšší nepřesností, avšak při použití mimo mezí daných normou ČSN EN ISO 5167 může výsledné hodnoty kdokoliv zpochybnit. Doporučuje se zvýšit diferenční tlak tak, aby beta byla pod 0,75, pokud to není technicky možné, provádí se rozšíření potrubí na vyšší světlost.

6.3.1 Zvýšení diferenčního tlaku

Do výpočtu je dosazena mezní hodnota $\beta = 0,75$ a následně je zjištěn nejnižší možný diferenční tlak $\Delta p = 390,9$ [kPa]. Dle doporučení použití β v rozsahu pod 0,75 je zvolen diferenční tlak $\Delta p = 393$ [kPa], kde $\beta = 0,749$. Výsledné veličiny jsou uvedeny v tabulce 13. Na obrázku 5.8 je znázorněn postup výpočtu v EES.

Tabulka 13

Veličiny	$\Delta p=393$ [kPa]	Jednotky
	110 % průtoku	
Δp	393	[kPa]
p_1	18100	[kPa]
α	0,00001463	[1/K]
D_{20}	213	[mm]
q_m	91,667	[kg/s]
κ	1,29242	[1]
t_1	575	[°C]
Δt	555	[°C]
ρ_1	51,391	[kg/m ³]
μ_1	0,00003272	[kg/m.s]
Re_D	1,661E+07	[1]
C	0,5923	[1]
D	214,729	[mm]
A	0,003519	[1]
β	0,749	[1]
ε	0,9912	[1]
d	160,891	[mm]
d_{20}	159,595	[mm]

Z výpočtu byl stanoven průměr vnitřního kotouče clony:

- Pro $\Delta p = 393$ [kPa] je $d = 160,891$ [mm]

6.3.2 Stanovení rozsahu diferenčního tlaku

Chceme – li vhodně stanovit rozsah snímače tlakové difference, musíme stanovit diferenční tlak pro navrženou clonu a minimální průtok. Z výše vypočteného průměru d je zjištěn diferenční tlak pro 40 % průtoku a provádí se kontrola, zda vyhovuje požadavkům normy.

Tabulka 14

Veličiny	$\Delta p=393$ [kPa]	Jednotky
	40 % průtoku	
d	160,891	[mm]
p_1	18100	[kPa]
α	0,00001463	[1/K]
D_{20}	213	[mm]
q_m	33,333	[kg/s]
κ	1,29242	[1]
ε	0,9989	[1]
t_1	575	[°C]

Veličiny	$\Delta p=393$ [kPa]	Jednotky
	40 % průtoku	
Δt	555	[°C]
ρ_1	51,391	[kg/m ³]
μ_1	0,00003272	[kg/m.s]
Re_D	6,041E+06	[1]
C	0,5934	[1]
D	214,729	[mm]
d_{20}	159,595	[mm]
A	0,007904	[1]
β	0,749	[1]
Δp	50,977	[kPa]

Z tabulky 14 vyplývá, že i při minimálním průtoku navržený průměr vyhovuje normě. Pro dané hodnoty diferenčního tlaku je navržen snímač diferenčního tlaku YOKOGAWA EJX910 MULTIVARIABLE.

6.3.3 Nejistoty

- **Nejistota součinitele průtoku**

Ze známé hodnoty β na základě normy je stanoven výpočet nejistoty součinitele průtoku, který je pro $0,6 < \beta \leq 0,75$ roven $(1,667 \cdot \beta - 0,5) [\%]$.

Výpočet je proveden stejným způsobem jako při výpočtu nejistot u napájecí vody, viz obrázek 5.8. Hodnota nejistoty součinitele průtoku je uvedena v tabulce 15.

Tabulka 15

Veličiny	$\Delta p=393$ [kPa]	Jednotky
	110 % průtoku	
β	0,749	[1]
C	0,5923	[1]
nejistota C	0,749	[%]

Při minimálním průtoku se hodnota nejistoty součinitele průtoku C nezměnila, viz tabulka 16. Podmínku konstantnosti součinitele průtoku lze považovat za splněnou.

Tabulka 16

Veličiny	$\Delta p=393$ [kPa]	Jednotky
	40 % průtoku	
β	0,749	[1]
C	0,5934	[1]
nejistota C	0,749	[%]

- **Nejistota součinitele expanze**

Při výpočtu se vychází z rovnice (8). V programu EES je vypočtena pro 110 % a 40 % průtok nejistota součinitele expanze, viz tabulka 17 a 18.

Tabulka 17

Veličiny	$\Delta p=393$ [kPa]	Jednotky
	110 % průtoku	
Δp	393	[kPa]
p_1	18100	[kPa]
κ	1,29242	[1]
ε	0,9912	[1]
<i>nejistota ε</i>	0,0588	[%]

Tabulka 18

Veličiny	$\Delta p=393$ [kPa]	Jednotky
	40 % průtoku	
Δp	50,977	[kPa]
p_1	18100	[kPa]
κ	1,29242	[1]
ε	0,9989	[1]
<i>nejistota ε</i>	0,007627	[%]


```

Equations Window
"Vypocet nejistot"
"Nejistota soucinitele prutoku"
Function nejistota_fceC(d_pp:D_PIPE;beta)
  if beta<0,6 then
    nejistota_fceC=0,5
  else
    nejistota_fceC=(1,667*beta-0,5)
  endif
End
nejistota_C=nejistota_fceC(d_pp:D_PIPE;beta)
"Nejistota soucinitele expanze"
nejistota_epsilon=3,5*(DELTA_p/(kappa*p_1))

"Zadane hodnoty"
t_1=575 [C]
p_1=18100 [kPa]
delta_t=555[C]
q_m=91,667 [kg/s]
alfa=14,625E-6[1/K]
D_PIPE_20=213 [mm]
kappa=1,29242[1]
rho_1=Density(Steam_IAPWS;T=T_1;P=P_1)
mu_1=Viscosity(Steam_IAPWS;T=T_1;P=P_1)
delta_p=393 [kPa]
"Prepocty EES programu"
p_2=p_1-DELTA_p
D_PIPE=D_PIPE_20*(1+alfa*(delta_t))
d_PP=D_PIPE_20*(1+alfa*(delta_t))
beta=d_PP/D_PIPE
epsilon=1-(0,351+0,256*beta^4+0,93*beta^8)*(1-(p_2/p_1)^(1/kappa))
Re_D=(4*q_m)/(pi*mu_1*(D_PIPE/1000))
A=((19000*beta)/Re_D)^0,8
C=0,5961+0,0261*beta^2-0,216*beta^8+0,000521*(10^6*beta)/Re_D^0,7+(0,0188+0,0063*A)*beta^4
3,5*(10^6/Re_D)^0,3+(0,043+0,080-0,123)*(1-0,11*A)*(beta^4/1-beta^4)
q_m=C/sqrt(1-beta^4)*epsilon*pi/4*(d_PP/1000)^2*sqrt(2*(DELTA_p*1000)*rho_1)
DELTA_omega=((sqrt(1-beta^4*(1-C^2))-C*beta^2)/(sqrt(1-beta^4*(1-C^2))+C*beta^2))*DELTA_p

```

Obr. 5.8 Vzor programu EES se zadanými vzorci pro přepoččet nejistot

6.3.4 Porovnání návrhu clony vzhledem k velikosti tlakové ztráty

Tlaková ztráta se určí ze vzorce (8). Program EES vypočítá hodnoty, které jsou uvedeny v tabulce 19.

Tabulka 19

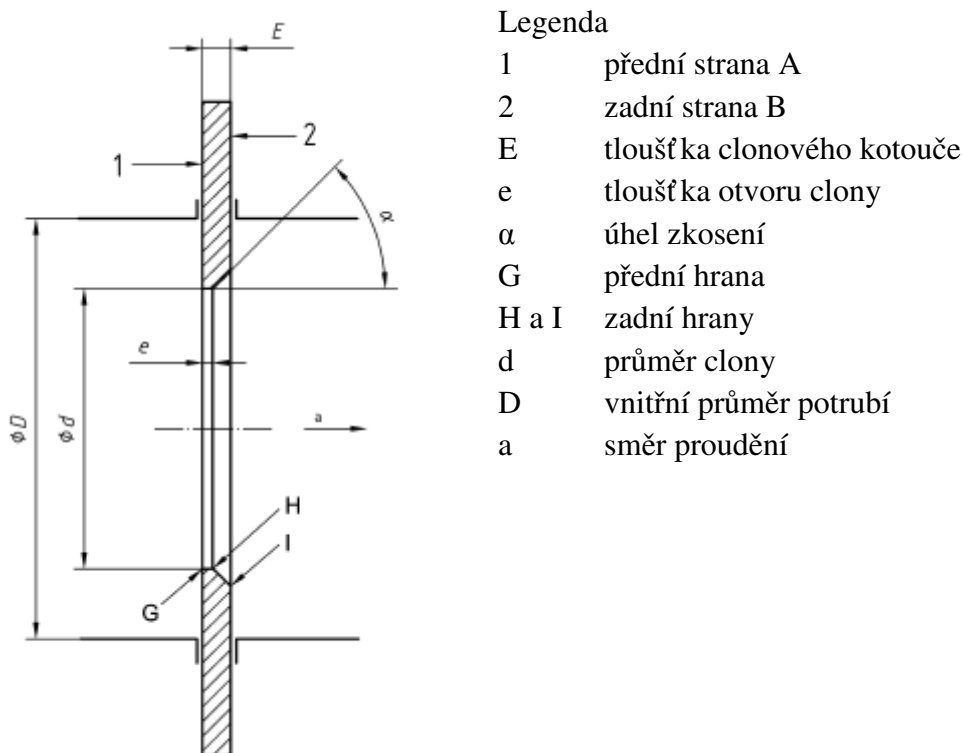
Veličiny	$\Delta p=393$ [kPa]		Jednotky
	110 % průtoky	40 % průtoky	
q_m	91,667	33,333	[kg/s]
β	0,749	0,749	[1]
C	0,5923	0,5934	[1]
Δp	393	50,977	[kPa]
$\Delta \omega$	179,531	23,255	[kPa]

6.4 Návrh rozměrů clony dle normy ČSN EN ISO 5167-2

Nejběžnější používanou clonou je clona kruhového průřezu a soustředná s osou potrubí. Musí být splněna podmínka zcela zaplněného potrubí. Strany kotouče musí být vždy rovinné a rovnoběžné. Při návrhu clony postupujeme podle norem:

- ČSN EN ISO 5167 – 1
- ČSN EN ISO 5167 – 2

Normalizovaný clonový kotouč je znázorněn na obrázku 5.9.



Obr. 5.9 Normalizovaný clonový kotouč[4]

6.4.1 Parametry clony

Následující kapitola je citovaná z [4]

Norma stanovuje pro jednotlivé části, popsané na obrázku 5.9, technické parametry a rozmezí pro stanovení rozměrů.

- **Přední strana A**

Přední strana A clonového kotouče musí být rovinná, pokud je clona zabudována v potrubí s nulovým diferenčním tlakem. Za rovinný lze považovat kotouč, pokud největší mezera mezi kotoučem a přímkovým pravítkem délky D je menší než $0,005(D-d)/2$, tj. sklon je menší než 0,5 %. Přední strana kotouče musí mít parametr drsnosti $Ra < 10^{-4}d$ uvnitř kruhu o průměru ne menším než D a soustředným otvorem clony.

- **Zadní strana B**

Zadní strana musí být rovinná a rovnoběžná s přední stranou.

- **Tloušťky E a e**

Tloušťka e otvoru clony musí být mezi $0,005D$ a $0,02D$. Rozdíl mezi hodnotami e měřenými v libovolném bodě otvoru clony nesmí být větší než $0,001D$. Tloušťka E clonového kotouče musí být v mezi e a $0,05D$.

- **Úhel zkosení α**

Je – li tloušťka E clonového kotouče větší než tloušťka e otvoru clony, musí být kotouč na zadní straně zkosen. Úhel zkosení α musí být $45^\circ \pm 15^\circ$.

- **Hrany G, H a I**

Přední strana G musí být ostrá. Za takovou se považuje, pokud poloměr zaoblení hrany není větší než $0,0004d$. Přední hrana musí být pravoúhlá, to se považuje za splněné, jestliže úhel mezi otvorem clony a čelní stranou clonového kotouče je $90^\circ \pm 0,3^\circ$. Zadní hrany H a I jsou v oblasti odtrženého proudu, proto jsou požadavky na jejich jakost méně přísné, než požadavky na hranu G.

- **Průměr d clony**

Průměr d musí být ve všech případech větší nebo roven $12,5$ mm. Poměr průměrů $\beta = d / D$ musí být vždy roven $0,10$ a menší nebo roven $0,75$. Clona musí být válcovitá, to znamená, že žádný průměr se nesmí lišit o více než $0,05\%$ střední hodnoty průměru (za střední hodnotu průměrů lze považovat hodnotu měření alespoň čtyř průměrů, svírajících navzájem přibližně stejné úhly).

6.4.2 Návrh rozměrů clony pro měření napájecí vody

Při návrhu se vychází z hodnot:

- $d_{20} = 179,983 [mm]$ pro $\Delta p = 60 [kPa]$
- $D_{20} = 267,9 [mm]$

Přední strana A

Přední strana A musí být rovinná.

Zadní strana B

Zadní strana B musí být rovinná a rovnoběžná s přední stranou A.

Tloušťky E a e

Tloušťka otvoru clony e musí být v rozmezí mezi $0,005D_{20}$ a $0,02D_{20}$.

- Návrh: $e = 0,01 \cdot D_{20} = 0,01 \cdot 267,9 = 2,679 [mm]$

Tloušťka E clonového kotouče musí být v mezi e a $0,05D_{20}$.

- Návrh: $E = 0,015 \cdot D_{20} = 0,015 \cdot 267,9 = 4,019 [mm]$

Úhel zkosení α

Tloušťka E clonového kotouče větší než e tloušťka otvoru clony, proto musí být kotouč na zadní straně zkosen.

- Návrh: úhel $\alpha = 45^\circ$

Hrany G, H a I

Přední hrana G musí být ostrá. Vzhledem k tomu, že d_{20} je $\geq 25[mm]$, je tento požadavek pokládán za splněný vizuální prohlídkou. Přední hrana musí být pravoúhlá. Na zadní hrany H a I nejsou kladeny žádné větší požadavky.

Materiál

Clonový kotouč smí být vyroben z jakéhokoliv materiálu libovolným způsobem. Musí být zohledněna teplota a tlak a médium, které daným orgánem proudí.

- Návrh: materiál ocel 12020.

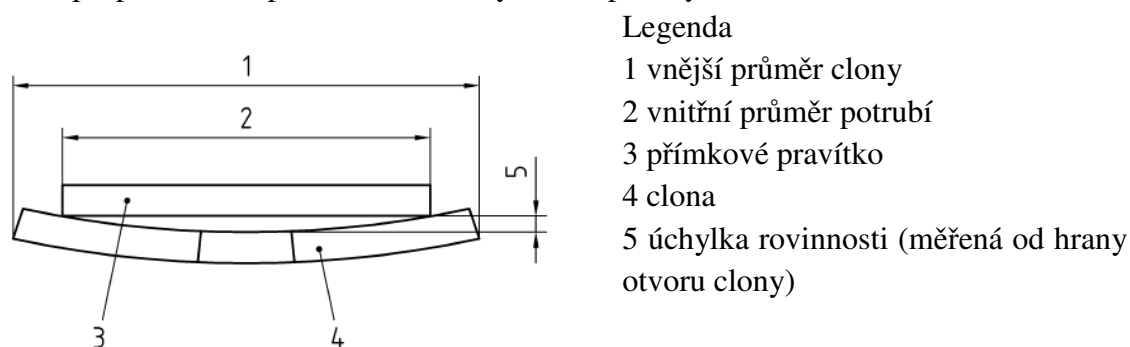
Odběry tlaku

Pro napájecí vodu je navržen koutový odběr tlaku s bodovými odběry. Minimální průměr a bodového odběru, je určen praktickou potřebou předejít náhodnému ucpání a mít uspokojivé dynamické vlastnosti.

- Návrh: $a = 0,015D_{20} = 0,015 \cdot 267,9 = 4,019[mm]$

6.4.2.1 Kontrola minimální tloušťky clonového kotouče

Plastické prohnutí i pružná deformace vyvolaná velikostí diferenčního tlaku nesmí způsobit při provozních podmínkách odchýlení od přímky o více než 1 %, viz obr. 5.10.



Obr. 5.10 Měření rovinnosti clonového kotouče

Pro zabránění plastického prohnutí musí být tloušťka taková, která vychází z rovnice (10).

$$\frac{E}{D_{20}} > \sqrt{\frac{\Delta p}{\sigma_y} (0,681 - 0,651 \cdot \beta)} \quad (10)$$

kde

E je tloušťka clonového kotouče $[mm]$

D_{20} je vnitřní průměr potrubí $[mm]$

β	poměr průměrů	[1]
Δp	diferenční tlak	[Pa]
σ_y	mez kluzu	[Pa]

$$E > D_{20} \cdot \left(\sqrt{\frac{\Delta p}{\sigma_y} (0,681 - 0,651 \cdot \beta)} \right) \quad [mm] \quad (11)$$

Po dosazení rozměrů do rovnice (11) se získá hodnota minimální tloušťky clonového kotouče, která je porovnána z výše navrženým rozměrem.

$$E > 3,239 [mm]$$

$\sigma_y = 100000000 [Pa]$, což je doporučená hodnota dle ISO/TR 9464:1998.

Navržený rozměr tloušťky clonového kotouče $E = 4,019 [mm]$ tedy vyhovuje, nedojde k plastickému prohnutí.

6.4.3 Návrh rozměrů clony pro měření přehřáté páry

Návrh je shodný s postupem u napájecí vody.

- $d_{20} = 159,595 [mm]$ pro diferenční tlak $\Delta p = 393 [kPa]$
- $D_{20} = 213 [mm]$

Přední strana A

Přední strana A musí být rovinná.

Zadní strana B

Zadní strana B musí být rovinná a rovnoběžná s přední stranou A.

Tloušťky E a e

- Návrh: $e = 0,01 \cdot D_{20} = 0,01 \cdot 213 = 2,13 [mm]$
- Návrh: $E = 0,015 \cdot D_{20} = 0,015 \cdot 213 = 3,195 [mm]$

Úhel zkosení α

- Návrh: úhel $\alpha = 45^\circ$

Hrany G, H a I

Přední hrana G musí být ostrá. Vzhledem k tomu, že d_{20} je $\geq 25 [mm]$, je tento požadavek pokládán za splněný vizuální prohlídkou.

Materiál

- Návrh: materiál ocel 15128

Odběry tlaku

Pro přehřátou páru je navržen koutový odběr tlaku s bodovými odběry.

- Návrh: $a = 0,015 D_{20} = 0,015 \cdot 213 = 3,195 [mm]$

6.4.3.1 Kontrola minimální tloušťky clonového kotouče

Vychází se z rovnice (10) a (11). Po dosazení rozměrů je zjištěna hodnota minimální tloušťky clonového kotouče, která je porovnána z výše navrženým rozměrem.

$$E > 213 \cdot \left(\sqrt{\frac{393000}{1000000000}} (0,681 - 0,651 \cdot 0,749) \right)$$

$$E > 5,872 [mm]$$

$\sigma_y = 100000000 [Pa]$, což je doporučená hodnota dle ISO/TR 9464:1998.

Navržený rozměr tloušťky clonového kotouče $E = 3,195 [mm]$ nevyhovuje, a proto je nutné hodnotu zvýšit:

- $e = 0,02 \cdot D_{20} = 0,02 \cdot 213 = 4,26 [mm]$
- $E = 0,03 \cdot D_{20} = 0,03 \cdot 213 = 6,39 [mm]$

V přílohách 1 a 2 jsou obsaženy výkresy navržených clon pro napájecí vodu a přehřátou páru.

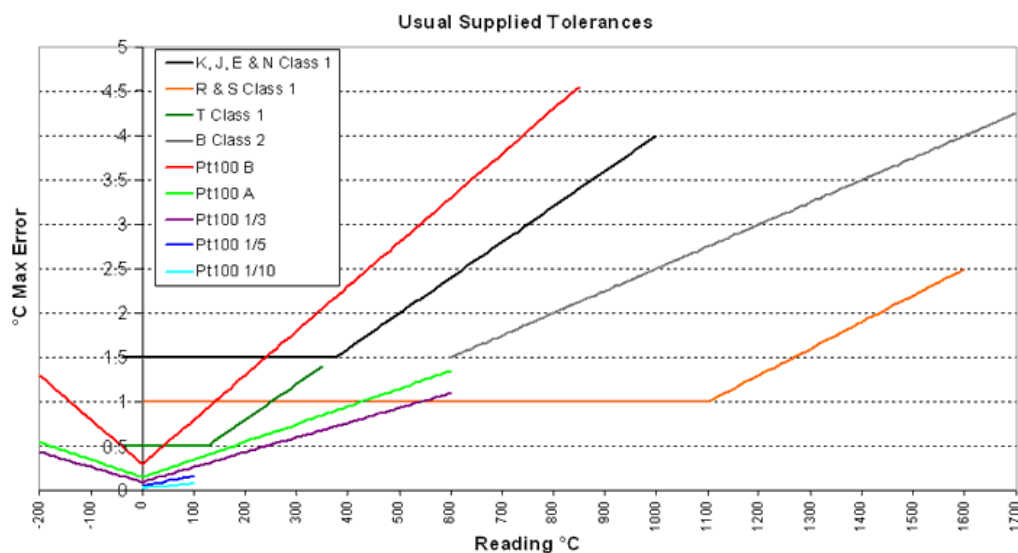
7 Porovnání navržených variant z hlediska ekonomického a z hlediska přesnosti měření

7.1 Porovnání navržených variant z hlediska přesnosti měření

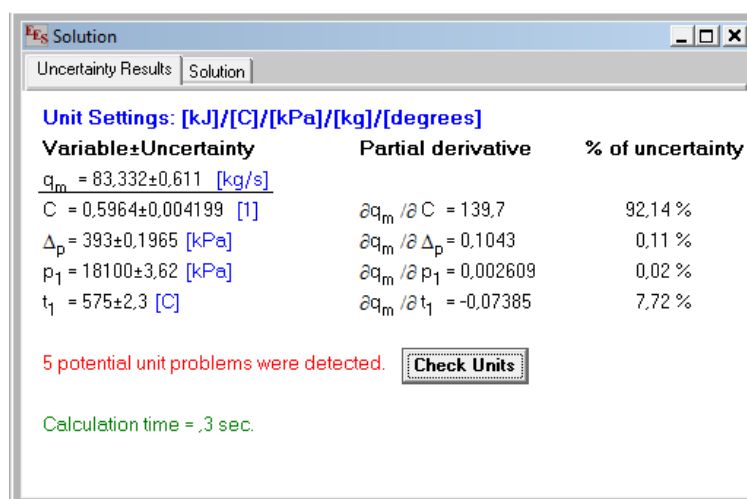
Nejistota měření hmotnostního průtoku se určí pomocí programu EES, který stanoví vliv nejistoty měření součinitele průtoku C , diferenčního tlaku Δp , statického tlaku p_1 a teploty t_1 na celkovou hodnotu hmotnostního průtoku. Na základě zadání je porovnáván vliv použití dvou různých snímačů teploty, termočlánu typu K a odporového snímače teploty Pt100.

- **Posouzení vhodnosti použití termočlánu K**

Na obrázku 6.1 je znázorněna odchylka s jakou snímače měří. Pro termočlánek K je z grafu odečtena pro teplotu $575^\circ C$ nejistota měření $\pm 2,3^\circ C$. Tato hodnota po dosazení do programu EES se podílí na celkové nejistotě měření $7,72\%$, viz obrázek 6.2.



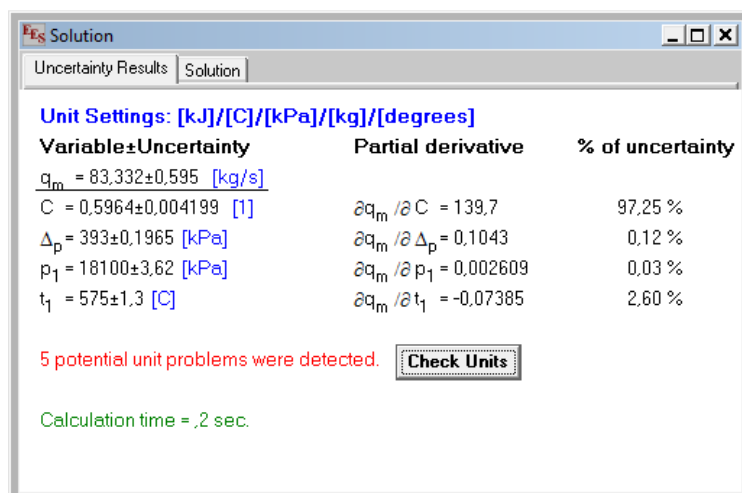
Obr. 6.1 Graf odchylek teplotních snímačů



Obr. 6.2 Výsledné hodnoty pro termočlánek typu K

- **Posouzení vhodnosti použití odporového snímače teploty Pt100**

Z grafu 6.1 pro teplotní snímač Pt100 je pro teplotu 575°C zřejmá odchylka $\pm 1,3^\circ\text{C}$. Na celkovou nejistotu měření má 2,6 % vliv, viz obrázek 6.3.



Obr. 6.3 Výsledné hodnoty pro teplotní snímač Pt100

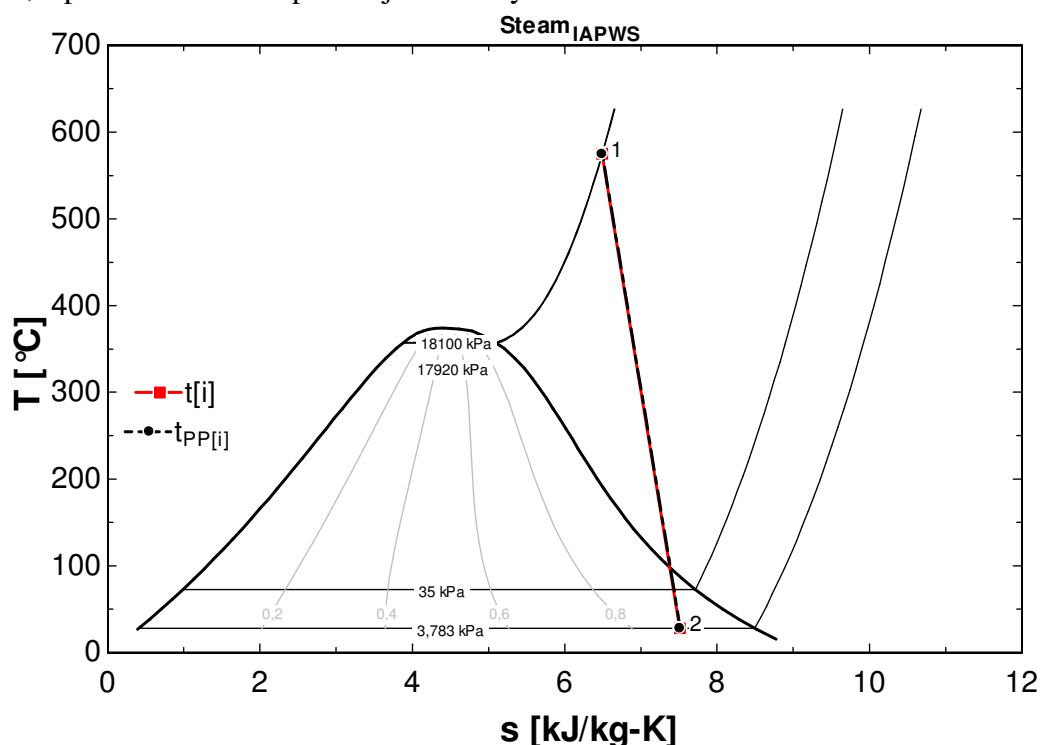
Celková nejistota měření hmotnostního průtoku pro obě varianty je uvedena v tabulce 20. Po srovnání vlivu snímačů na nejistoty bylo zjištěno, že díky větší přesnosti snímače Pt100 je nejistota měřeného průtoku pro toto měřidlo o $\pm 0,016$ [kg/s] menší.

Tabulka 20

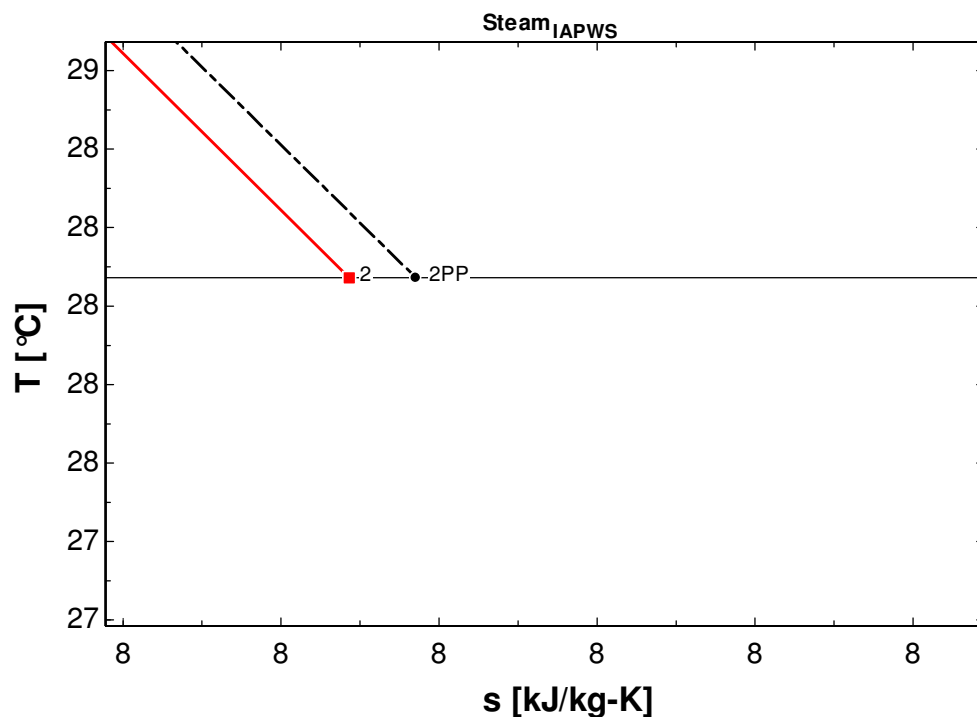
Teplotní snímač	Absolutní nejistota	Vliv na celkovou nejistotu	Výsledný $q_m \pm$ nejistota
	[°C]	[%]	[kg/s]
Termočlánek K	2,3	7,72	83,332 \pm 0,611
Pt100	1,3	2,6	83,332 \pm 0,595

7.2 Porovnání navržených variant z hlediska ekonomického

Když dojde k seškrcení průtoku na požadovaný diferenční tlak, vznikne tlaková ztráta. Při měření přehřáté páry tlaková ztráta způsobí snížení tlaku na vstupu do turbíny. Následující kapitola porovnává ekonomický důsledek v případě, kdy dojde k seškrcení průtoku na diferenční tlak $\Delta p = 393$ [kPa] a kdy nedojde k seškrcení vůbec. Je zde zahrnuta i celková nejistota měření hmotnostního průtoku pro oba teplotní snímače. Na grafech 6 a 7 je znázorněn rozdíl mezi stavem, kdy je průtok seškrcen a stavem, kdy nedojde k měření a tudíž nevznikne žádná tlaková ztráta. Vzhledem k nejednoznačnosti rozdílu je na grafu 7 zvětšený detail stavu po expanzi v turbíně. Na obrázku 6.4 je ukázán postup výpočtu v EES. Výsledné hodnoty z programu EES jsou znázorněny na obrázku 6.5 a shrnuty v tabulce 21. Při výpočtu je bráno v úvahu, že z kotle je přehřátá pára dopravována dvojicí potrubí, a proto hmotnostní průtok je nutné vynásobit dvěma.



Graf 6. T-s diagram rozdílů dvou stavů



Graf 7 Detail stavu po expanzi v turbíně

```

Equations Window
m_dot=166,66667 [kPa]
eta_ize=0,8
eta_el=0,97
DELTAp_trvalá=179,531 [kPa]
t[1]=575 [C]
t_PP[0]=575 [C]
P_sat=P_sat(Steam_IAPWS;T=28)
p[1]=18100 [kPa]
p[2]=p_sat
p_PP[0]=18100 [kPa]
p_PP[1]=p_PP[0]-DELTAp_trvalá
p_PP[2]=p_sat

s[1]=Entropy(Steam_IAPWS;T=T[1];P=P[1])
s[2]=Entropy(Steam_IAPWS;h=h[2];P=P[2])
s_2_ize=s[1]
s_PP[0]=Entropy(Steam_IAPWS;T=T_PP[0];P=P_PP[0])
s_PP[1]=Entropy(Steam_IAPWS;h=h_PP[1];P=P_PP[1])
s_PP[2]=Entropy(Steam_IAPWS;h=h_PP[2];P=P_PP[2])
s_PP_2_ize=s_PP[1]
h[1]=Enthalpy(Steam_IAPWS;T=T[1];P=P[1])
h_2_ize=Enthalpy(Steam_IAPWS;s=s_2_ize;P=P[2])
h_PP[0]=Enthalpy(Steam_IAPWS;T=T_PP[0];P=P_PP[0])
h_PP[1]=h_PP[0]
h_PP_2_ize=Enthalpy(Steam_IAPWS;s=s_PP_2_ize;P=P_PP[2])
T[2]=Temperature(Steam_IAPWS;P=P[2];h=h[2])
T_PP[1]=Temperature(Steam_IAPWS;P=P_PP[1];h=h_PP[1])
T_PP[2]=Temperature(Steam_IAPWS;P=P_PP[2];h=h_PP[2])

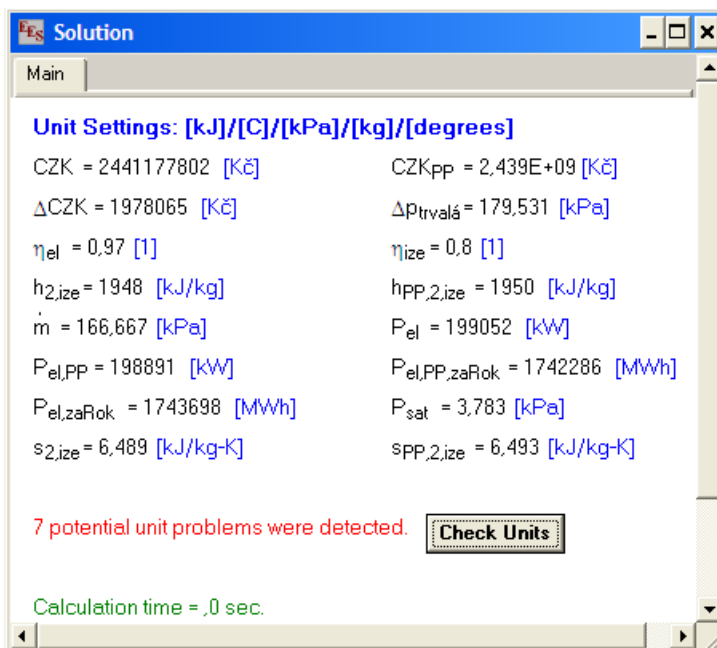
eta_ize=(h[1]-h[2])/(h[1]-h_2_ize)
eta_ize=(h_PP[1]-h_PP[2])/(h_PP[1]-h_PP_2_ize)

P_el=m_dot*(h[1]-h[2])*eta_el
P_el_PP=m_dot*(h_PP[1]-h_PP[2])*eta_el
P_el_zarok=(P_el*24*365)/1000
P_el_PP_zarok=(P_el_PP*24*365)/1000

CZK=P_el_zarok*1400
CZK_PP=P_el_PP_zarok*1400
DELTACZK=CZK-CZK_PP

```

Obr. 6.4 Ukázka zadávání vzorců v EES



Obr. 6.5 Výsledné hodnoty v programu EES

Tabulka 21

Varianta	Δp	$\Delta \omega$	P_{el}	$P_{el/rok}$	P_{elCZK}
	[kPa]	[kPa]	[MW]	[MWh]	[Kč/rok]
Se seškrcením (PP)	393	179,531	198,891	1742286	2,439E+09
Bez seškrcení	-	0	199,052	1743698	2,441+09
Ztráta	-	-	0,161	1412,36	1978065

kde

Δp je diferenční tlak

$\Delta \omega$ trvalá tlaková ztráta

P_{el} je elektrický výkon

$P_{el/rok}$ elektrický výkon za rok

P_{elCZK} elektrický výkon za rok vyčíslený v Kč

7.2.1 Ekonomické srovnání pro termočlánek typu K a odporový teplotní snímač Pt100

Na výslednou ekonomickou bilanci má dopad celková nejistota měření hmotnostního průtoku. Z výše uvedeného výpočtu nejistoty je provedeno vyhodnocení vlivu při použití termočláneku typu K a při použití odporového teplotního snímače Pt100, viz tabulka 22. Je počítáno pomocí vzorců znázorněných na obrázku 6.4.

- Pro termočlánek K byla zjištěna celková nejistota měření hmotnostního průtoku $83,332 \pm 0,611$.
- Pro teplotní snímač Pt100 činí celková nejistota měření hmotnostního průtoku $83,332 \pm 0,595$.

Tabulka 22

Varianta	Termočlánek K		Pt100	
	$P_{el/rok}$	P_{elCZK}	$P_{el/rok}$	P_{elCZK}
	[MWh]	[mil. Kč/rok]	[MWh]	[mil. Kč/rok]
Pro $\Delta p=350$ [kPa]	1742286±12774	2439±17,898	1742286±12440	2439±17,430

..

8 Závěr

Bakalářská práce se v úvodu zabývá měřením průtoku a metodami, které dnešní technické možnosti nabízejí. Škrťící orgány, clona, dýza a Venturiho trubice patří v energetice mezi běžně používané typy měřidel. Při porovnávání škrťících orgánů se clona vyznačuje nízkou tlakovou ztrátou a poměrně vysokou přesností měření, je však náchylná na opotřebení.

Cílem bylo navrhnout clonové kotouče pro napájecí vodu a přehřátou páru, které jsou vyhovující v rámci normy ČSN EN ISO 5167. Bylo vycházeno ze zadaných parametrů a hlavním zjištěným rozměrem byl vnitřní průměr clony d_{20} . Pro parametry napájecí vody vstupující do kotle byl tento návrh proveden bezproblémově, vzhledem k nízkým hodnotám teploty a diferenčního tlaku. Clonový kotouč s rozměry $d_{20} = 179,983$ mm je uveden v příloze 1. Při výstupu z kotle má přehřátá pára problematické parametry, pro které nebylo možné clonu navrhnout. Pro zadaný diferenční tlak byl součinitel průměrů β mimo rozsah stanovený normou. V těchto případech se doporučuje zvýšit diferenční tlak, pokud to technicky není proveditelné, tak rozšířit světlost potrubí. Došlo tedy k navýšení diferenčního tlaku na minimální možnou hodnotu a to $\Delta p = 393$ kPa. Při takovém seškrcení je tlaková ztráta vysoká. Navržený clonový kotouč s rozměrem $d_{20} = 159,595$ mm je uveden v příloze 2.

Bylo provedeno srovnání ekonomického dopadu na výrobu elektřiny mezi stavem, kdy nedojde k seškrcení průtoku a stavem, kdy je vysoký diferenční tlak. V případě vysoké tlakové ztráty se sníží účinnost parního cyklu, neboť přehřátá pára vstupuje do turbíny s nižším tlakem, což způsobí nižší entalpický spád a celkové snížení elektrického výkonu. Z tohoto srovnání vyplynulo, že pokud bychom použili clonu při diferenčním tlaku 393 kPa, škrťící orgán by způsobil elektrárně roční ztrátu cca 1 978 000 Kč.

Návrh clony pro přehřátou páru byl porovnán i z hlediska nejistoty měření. Do celkové nejistoty měření hmotnostního průtoku bylo nutné zahrnout všechny měřené veličiny. Bylo provedeno srovnání vlivu měření teploty pomocí dvou různých snímačů teploty na celkovou nejistotu. Závěrem je, že teplotní snímač Pt100 měří oproti termočláнку K s větší přesností a v konečném důsledku je pomocí tohoto snímače vypočítán elektrický výkon elektrárny s přesností $1\,742\,286 \pm 12\,440$ MWh za rok, což v přepočtu při sazbě 1400 Kč za MWh elektrického výkonu činí $2439 \pm 17,430$ mil. Kč za rok. U termočláunku získáme hodnoty $1\,742\,286 \pm 12\,774$ MWh za rok a $2439 \pm 17,898$ mil. Kč za rok.

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Michal Stáňa PhD. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

9 Seznam použité literatury

- [1] *Metrologie průtoku 2008*. 1. vydání. Okružní 31, 638 00, Brno : Český metrologický institut, 2008. 254 s. ISBN 978-80-254-2196-3.
- [2] JANALÍK, Jaroslav. *Měření tekutinových mechanismů* [online]. Ostrava : 1995
Dostupné z : http://www.338.vsb.cz/PDF/Mereni_tek_mech.pdf
- [3] ČSN EN ISO 5167 – 1 Měření průtoku tekutin pomocí snímačů diferenčního tlaku vložených do zcela zaplněného potrubí kruhového průřezu – Část 1: Obecné principy a požadavky, Český normalizační institut, listopad 2003
- [4] ČSN EN ISO 5167 – 2 Měření průtoku tekutin pomocí snímačů diferenčního tlaku vložených do zcela zaplněného potrubí kruhového průřezu – Část 2: Clony, Český normalizační institut, listopad 2003
- [5] ČSN EN ISO 5167 – 3 Měření průtoku tekutin pomocí snímačů diferenčního tlaku vložených do zcela zaplněného potrubí kruhového průřezu – Část 3: Dýzy a Venturiho dýzy, listopad 2003
- [6] ČSN EN ISO 5167 – 4 Měření průtoku tekutin pomocí snímačů diferenčního tlaku vložených do zcela zaplněného potrubí kruhového průřezu – Část 4: Venturiho trubice, listopad 2003
- [7] <http://www.badgermeter.cz/produkty> - indukční průtokoměry
- [8] <http://www.badgermeter.cz/produkty/mechanicke-prutokomery>-turbínové průtokoměry
- [9] http://is.sssep9.cz/podklady/bransovsky/Automatizace/AUT_1_20_Objemov%C3%A1%20a%20pr%C5%AFtokov%C3%A1%20m%C4%9B%C5%99idla%20II.pdf
- [10] www.mattech.cz - clony
- [11] <http://www.prutoky.cz/kapaliny/teorie/priklady-mericich-metod/> - příklady měřících metod
- [12] <http://www.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=4624> – Měření průtoku tekutin – principy měření průtoku

10 Seznam příloh

Příloha 1 – Návrh clony pro napájecí vodu

Příloha 2 – Návrh clony pro přehřátou páru